



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ MECHANICKÝCH  
VLASTNOSTÍ STRUKTUR VYRÁBĚNÝCH KOVOVÝM 3D  
TISKEM**

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURES MADE BY METAL 3D  
PRINT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Radek Porubský**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Ondřej Vaverka**

**BRNO 2021**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Radek Porubský**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení  
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Vaverka**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Experimentální zjištění mechanických vlastností struktur vyráběných kovovým 3D tiskem**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Různé prostorové struktury jsou s výhodou používány při návrzích dílů, kde je potřeba výrazně snížit hmotnost, absorbovat kinetickou energii nebo zvýšit prostupnost dílu. Vlivem nepřesností při jejich výrobě pomocí aditivních technologií neboli 3D tisku se ale liší jejich reálné a uvažované mechanické vlastnosti. Tím pádem může dojít až k selhání dílu vlivem jeho poddimenzování. Znalost reálných mechanických vlastností je tedy při návrhu klíčová a lze získat pouze experimentálně.

Typ práce: výzkumná.

### **Cíle bakalářské práce:**

Hlavním cílem je porovnat teoretické a reálné mechanické vlastnosti struktur vyráběných kovovým 3D tiskem a formulovat hypotézu, která vysvětlí případný rozdíl v pozorovaných datech.

Díličí cíle bakalářské práce:

- návrh experimentu,
- realizace testů,
- vyhodnocení získaných dat a tvorba hypotézy.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data.

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukoncení/>.

**Seznam doporučené literatury:**

LEARY, M., MAZUR M., ELAMBASSERIL, J., MCMILLAN, M., CHIRENT, T., SUN, Y., QIAN, M., EASTON, M. a M. BRANDT. Selective laser melting (SLM) of AISi12Mg lattice structures. Materials and Design. 2016, vol. 98, s. 344–357. ISSN 1873-4197.

HANZL, P., ZETKOVA I. and M. DANA. A Comparison of Lattice Structures in Metal Additive Manufacturing. In Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium, Vienna, Austria, 2017, s. 0481–0485. ISBN 978-3-902734-11-2, ISSN 1726-9679.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá smykovým testováním mikro-prutových struktur, vyrobených technologií Selective laser melting. Způsob testování vycházel z normy ASTM D7078, která se zabývá testováním kompozitů. Pro experiment byly vybrány mikro-prutové struktury BCC a FCC s různými průměry prutu. V práci je popsán průběh a výsledky smykových zkoušek. Tyto reálné výsledky jsou porovnány s výsledky analýzy Metodou konečných prvků. Výsledky práce porovnávají vlastnosti struktur v závislosti na průměru prutu, typu struktury nebo na směru zatížení. Rozebrán je také vliv technologie výroby na vlastnosti struktur při zatěžování smykem. Výsledky ukázaly například to, že FCC struktura má při zatěžování smykem lepší mechanické vlastnosti než struktura BCC. U obou struktur se také potvrdilo, že struktury s větším průměrem prutu mají podstatně lepší vlastnosti než ty s průměrem prutu menším.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Mikro-prutové struktury, Selective laser melting, smykové testování, Metoda konečných prvků

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with shear testing of lattice structures produced by the Selective laser melting technology. The testing method was based on the ASTM D7078 standard, which deals with the testing of composites. BCC and FCC lattice structures with different strut diameters were selected for the experiment. The work describes the course and results of shear test. These real results are compared with results of finite element analysis. The results compare the properties of structures depending on the diameter of the strut, the type of structure or the direction of loading. The influence of Selective laser melting production technology on the properties of structures under shear loading is also discussed. For example, the results showed that the FCC structure has better mechanical properties under shear loading than the BCC structure. For both structures, it was also confirmed that structures with a larger strut diameter have significantly better properties than those with a smaller strut diameter.

## KEYWORDS

Lattice structures, Selective laser melting, shear testing, Finite element method

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PORUBSKÝ, Radek. *Experimentální zjištění mechanických vlastností struktur vyráběných kovovým 3D tiskem*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132571>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Ondřej Vaverka.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Vaverky a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Radek Porubský

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ondřeji Vaverkovi za odborné rady, věcné připomínky, trpělivost a vždy vstřícný přístup. Dále děkuji rodině za podporu při studiu.



# OBSAH

<b>Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Přehled současného stavu poznání.....</b>	<b>11</b>
1.1 Selective laser melting (SLM) .....	11
1.2 Prostorové struktury .....	11
1.3 Mechanické vlastnosti mikro-prutových struktur .....	13
1.4 Metody smykového testování .....	18
1.4.1 Metoda dle normy ASTM D5379.....	19
1.4.2 Metoda dle normy ASTM D7078.....	19
1.4.3 Metoda dle normy ASTM D4255.....	20
1.4.4 Arcanův test.....	20
<b>2 Materiál a metody.....</b>	<b>21</b>
2.1 Volba mikro-prutových struktur k testování.....	21
2.2 Návrh tvaru testovacích vzorků .....	21
2.3 Zařízení pro výrobu vzorků .....	25
2.4 Příprava a výroba vzorků .....	26
2.5 Testovací zařízení .....	29
2.5.1 Zwick/Roell Z250.....	29
2.5.2 Imada MX2–2500N .....	30
2.6 Průběh testování.....	30
2.7 Nastavení MKP .....	32
2.8 Očekávané výsledky k vyhodnocování.....	33
<b>3 Výsledky .....</b>	<b>34</b>
3.1 Výsledky ze zařízení Zwick/Roell Z250 .....	34
3.2 Výsledky ze zařízení Imada MX2-2500N .....	35
3.3 Výsledky MKP výpočtů.....	37
3.4 Sumarizace výsledků .....	38
<b>4 Diskuze.....</b>	<b>39</b>
4.1 Porovnání vlastností struktur v závislosti na průměru prutu .....	39
4.2 Porovnání vlastností struktur v závislosti na typu struktury .....	39
4.3 Zhodnocení vlivu technologie výroby na vlastnosti struktur.....	40
4.4 Porovnání vlastností struktur v závislosti na směru zatížení .....	40
4.5 Zhodnocení směrodatnosti výsledků z jednotlivých zařízení .....	41
4.6 Vyhodnocení vlivu rozmístění vzorků při výrobě .....	42
<b>Závěr.....</b>	<b>43</b>
<b>Použité informační zdroje.....</b>	<b>44</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů.....</b>	<b>47</b>

## ÚVOD

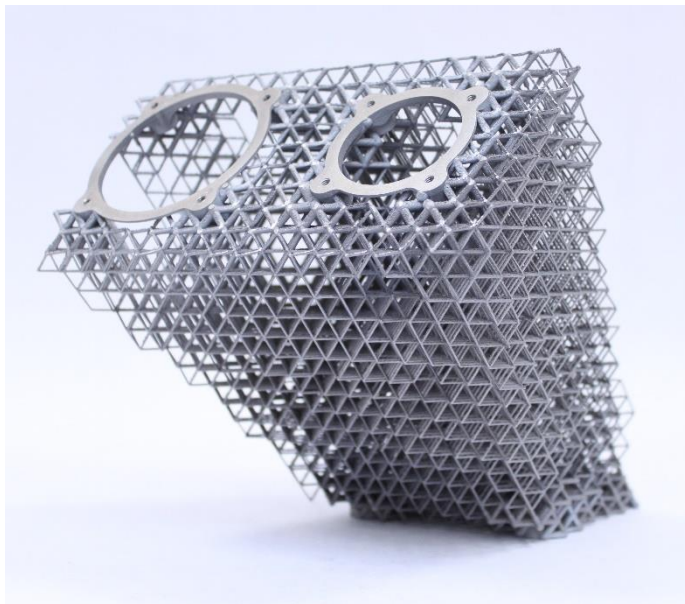
Aditivní technologie jsou nekonvenční metodou výroby, která je na rozdíl od tradičních metod jako je obrábění nebo odlévání založena na postupném přidávání materiálu vrstvu po vrstvě. Tato technologie je v současné době na strmém vzestupu mimo jiné i proto, že přinesla nové možnosti jak rychle a efektivně vyrobit díly, které jsou díky své tvarové komplikovanosti konvenčními metodami jen stěží vyrobitelné nebo dokonce nevyrobitelné.

3D tisk nachází velké uplatnění například u odlehčování dílů, kdy je plný materiál nahrazen různými prostorovými strukturami. Mezi tyto prostorové struktury patří mikro-prutové struktury, které jsou tvořeny pravidelně se opakujícími prutovými buňkami a jsou efektivně vyrobitelné pouze aditivními technologiemi.

Cílem takto vyráběných odlehčených dílů (viz obr. 0.1) je výrazně snížit hmotnost, absorbovat kinetickou energii nebo zvýšit prostupnost dílu tak, aby byla v co největší míře zachována jejich pevnost a tuhost. Aby bylo možné takový díl optimálně navrhnout a aby případně nedošlo k jeho poddimenzování, je nutné znát reálné mechanické vlastnosti těchto struktur.

Mechanické vlastnosti různých typů mikro-prutových struktur jsou již do jisté míry známe, zejména pak při zatěžování tahem či tlakem. Neexistuje však zatím mnoho výzkumů, které by se zabývaly mechanickými vlastnostmi mikro-prutových struktur při zatěžování smykem.

Cílem této práce je zjistit na základě navrženého experimentu reálné mechanické vlastnosti vybraných typů mikro-prutových struktur při zatěžování smykem a výsledky porovnat s mechanickými vlastnostmi teoretickými.

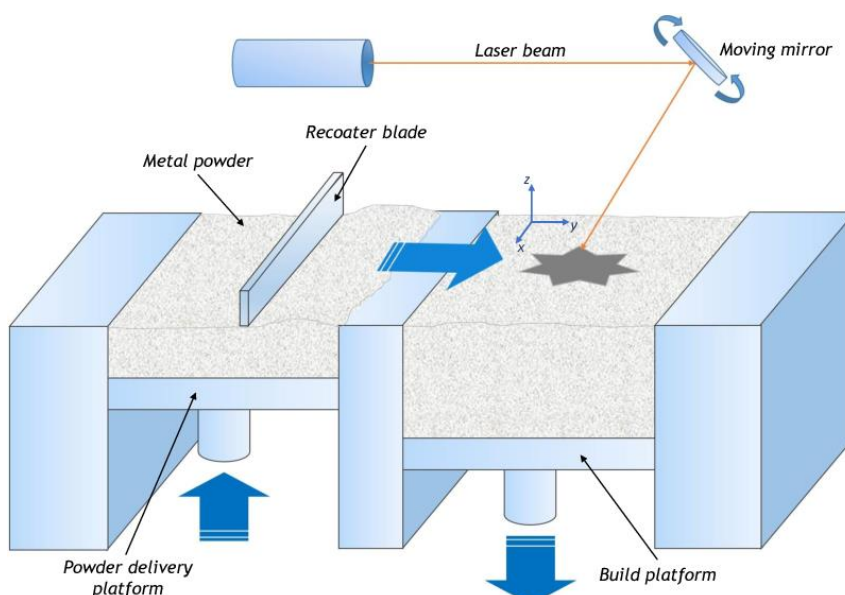


*Obr. 0.1 Ultralehká konzola pro komunikační antény satelitu vyrobená aditivní technologií [1]*

# 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

## 1.1 SELECTIVE LASER MELTING (SLM)

3D tisk může být realizován různými způsoby. Nanášením vrstev taveniny, spojováním speciálních fólií nebo spékáním prášku. Metoda SLM patří k metodám, kdy je materiálem kovový prášek. Princip metody SLM (viz obr. 1.1) spočívá ve využití energie paprsku laseru, který vždy roztaví jemné částice prášku v rámci jedné vrstvy. Po rychlém ztuhnutí předchozí vrstvy se základová deska sníží o hodnotu tloušťky vrstvy, která zpravidla bývá 20-100  $\mu\text{m}$ . Následuje nanesení další vrstvy a roztavení částic prášku v místech, kde mají návaznost na předchozí vrstvu. Tento cyklus se opakuje, dokud nevznikne celý díl. Po vyjmutí platformy s vyrobeným dílem ze stroje je nutné díl od platformy odřezat, podle potřeby dále očistit a opravit. [14]



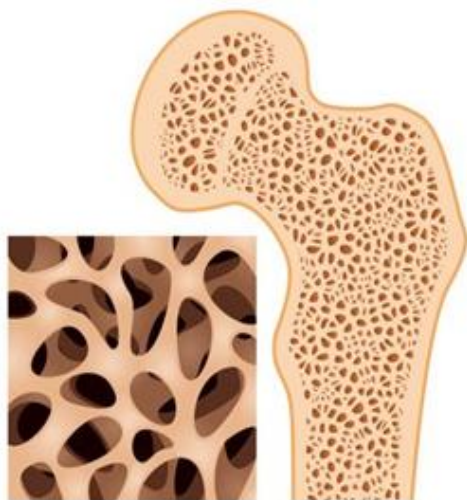
Obr. 1.1 Schéma principu metody SLM [4]

Celý proces výroby probíhá z bezpečnostních důvodů pod inertním plynem, nejčastěji to bývá argon, popřípadě dusík. Prášek, který se nevyužije na samotnou výrobu dílu, se dá znovu použít. Mezi nejčastěji používané materiály pro tuto metodu patří hliníkové a titanové slitiny nebo nerezové a nástrojové oceli.

## 1.2 PROSTOROVÉ STRUKTURY

Různé prostorové struktury jsou všude kolem nás, často se vyskytují také v přírodě. Za pórovité organické materiály můžeme považovat například dřevo nebo lidskou kostní tkáň (viz obr. 1.2). Strukturou kostní tkáně, popřípadě i jinými organickými porézními strukturami se inspirovaly například pěny, které jsou zástupcem nepravidelně uspořádaných struktur. V technické praxi se kvůli své nízké hmotnosti, schopnosti tlumení vibrací či dobré tepelné vodivosti často používají kovové pěny (viz obr. 1.3). Tyto kovové pěny jsou vyrobitelné

různými technologiemi, které jsou nejčastěji založeny na tvorbě bublin v roztaveném kovu. [5]



Obr. 1.2 Struktura lidské kosti [6]



Obr. 1.3 Hliníková pěna [7]

Vedle nepravidelně uspořádaných struktur jako jsou pěny existují struktury uspořádané pravidelně. Mezi tyto struktury řadíme například implicitní struktury, které se skládají z tenkých ploch popsaných matematickou funkcí. Jedním ze zástupců těchto implicitních struktur jsou gyroidní struktury, které byly mimo jiné rozpoznány ve strukturách šupin motýlích křídel. [9]

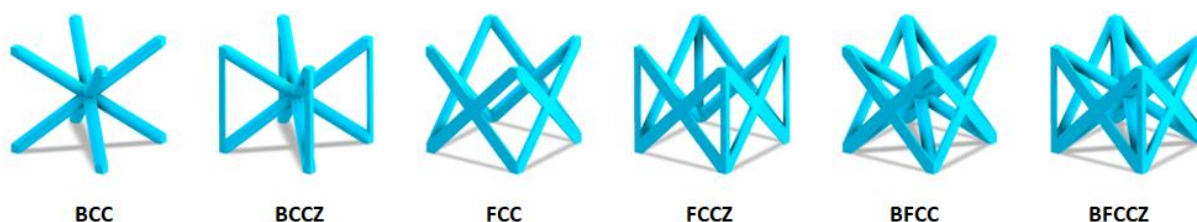
Gyroidní strukturu (viz obr. 1.4) jako první popsal v roce 1970 matematik Alan Schoen [8], který poukazoval na její dobré vlastnosti, pokud by se použila jako nosná konstrukce. Vzhledem ke svému složitému tvaru, těžko vyrobitelnému tradičními výrobními metodami, jí však v tomto směru nebyla věnována příliš velká pozornost. To se změnilo s příchodem 3D tisku. Tato gyroidní struktura svým tvarem nevyžaduje při výrobě 3D tiskem podpurné struktury, tudíž je touto metodou efektivně vyrobitelná.



Obr. 1.4 Gyroidní struktura [10]

Dalšími strukturami, které není možné efektivně vyrobit jinak než aditivně, jsou již zmíněné mikro-prutové struktury. Těmito mikro-prutovými strukturami se zabýval mimo jiné **Ashby** [2], který je definoval jako trojrozměrné struktury složené z pravidelně uspořádaných buněk vzájemně propojených vzpěrami (pruty) a uzly. Mikro-prutové neboli mřížkové struktury se tedy dají přirovnat k několikanásobně zmenšeným příhradovým konstrukcím. Příhradové konstrukce tak jak je známe, jsou dlouhá léta díky své vysoké tuhosti a pevnosti i při použití co nejmenšího množství materiálu využívány jako nosné konstrukce mostů, jeřábů a podobně. Tento princip by měl logicky fungovat i u mnohonásobně menších součástí, než jsou tyto gigantické konstrukce. Využít tyto struktury při odlehčování dílů, při zachování jejich požadovaných vlastností je kvůli jejich dosavadní nevyrobitelnosti možné až díky nástupu aditivních technologií.

Podle uspořádání prutů existuje řada druhů prutových buněk. Ty základní tvary buněk převzaly díky své topologii název od druhů krystalových mřížek. Na obrázku 1.5 lze vidět struktury BCC (kubická prostorově středěná), FCC (kubická plošně středěná) a strukturu BFCC což je jejich kombinace. Všechny varianty jsou navíc vyobrazeny v konfiguraci, kdy jsou přidány další pruty ve svislém směru.



Obr. 1.5 Základní tvary buněk mikro-prutových struktur

Jedním ze základních hledisek, které určují vlastnosti struktury, je tzv. Maxwellovo číslo. Podle tohoto čísla se rozdělují buňky na základě konektivity vzpěr na ty, kde při zatížení dominuje buď ohyb (*bending dominated*), nebo tah (*stretch dominated*). Toto Maxwellovo číslo  $M$  je v trojrozměrném prostoru vyjádřeno rovnicí (1-1), kde  $b$  značí počet vzpěr a  $j$  počet spojů dané buňky.

$$M = b - 2j + 6 \quad (1-1)$$

Pokud je  $M < 0$ , jedná se o buňku, kde dominuje ohyb, pokud je  $M \geq 0$ , jedná se o buňku, kde dominuje tah.

### 1.3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI MIKRO-PRUTOVÝCH STRUKTUR

Topologie, tvar a materiál buňky nejsou jedinými faktory ovlivňujícími vlastnosti struktury, důležitou roli hraje i délka hrany buňky a průměr prutu. Od toho se odvíjí relativní hustota struktury. [2]

Relativní hustotou  $\bar{\rho}$  se rozumí poměr objemu materiálu v buňce  $V_s$  a objemu prostoru  $V$ , kterým je buňka pomyslně ohraničena. V případě buňky BCC (viz obr. 1.6) je tímto



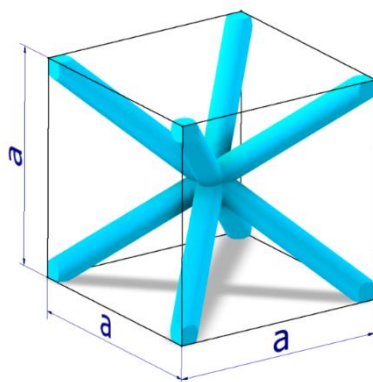
ohraničujícím prostorem krychle o délce hrany  $a$ . Pokud tedy budeme mít například buňku BCC o relativní hustotě 0,3, znamená to, že tato buňka vyplňuje 30 % objemu krychle, která ji ohraničuje.

Tento poměr je obecně popsán rovnicí (1-2).

$$\bar{\rho} = \frac{V_s}{V} \quad (1-2)$$

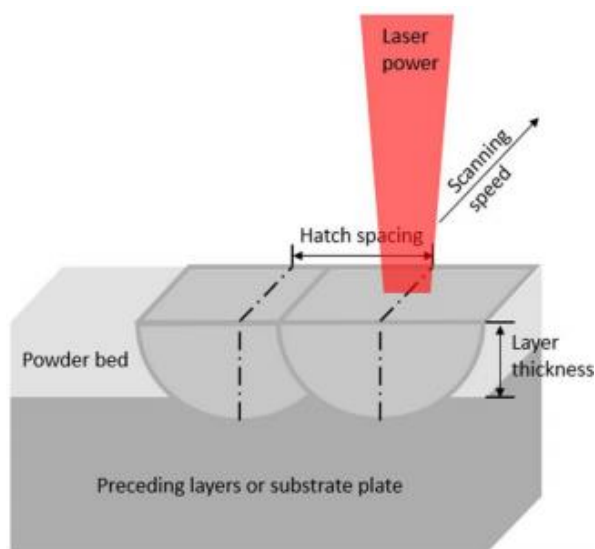
Pro případ, kde je ohraničujícím prostorem krychle o délce hrany  $a$ , pak platí rovnice (1-3).

$$\bar{\rho} = \frac{V_s}{a^3} \quad (1-3)$$



Obr. 1.6 Buňka BCC o délce hrany  $a$

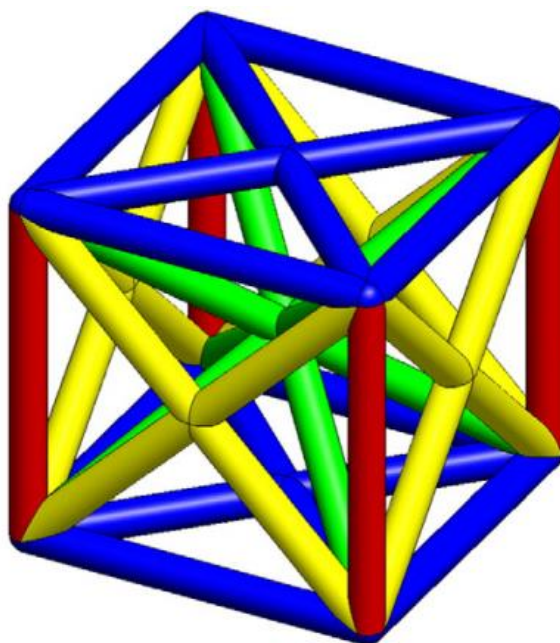
Mechanické vlastnosti mikro-prutových struktur ovlivňuje také technologie výroby. V případě výroby metodou SLM, tyto vlastnosti ovlivňují především procesní parametry jako je výkon laseru (*laser power*), rozteč skenování (*hatch spacing*), skenovací rychlost (*scanning speed*) a tloušťka vrstvy (*layer thickness*) (viz obr. 1.7). Nevhodně zvolené procesní parametry mohou u výrobku zapříčinit vznik nedokonalostí v podobě různých pórů, trhlin a podobně. [19]



Obr. 1.7 Procesní parametry SLM [19]

Existuje mnoho výzkumů, které se zabývají testováním mechanických vlastností mikroprutových struktur. Vzhledem k tomu, že se tyto struktury momentálně ukazují efektivní jako absorbéry energie (například různé tlumiče rázů v automobilovém průmyslu), nejčastějšími testy jsou právě testy tlakové a nárazové.

Například **Leary et al.** [22] se ve svém výzkumu zaměřili na mechanické vlastnosti mikroprutových struktur BCC, BCCZ, FCC, FCCZ a FBCCZ z materiálu AlSi12Mg a jejich vyrobitelnost metodou SLM. Zjistili, že nelze vyrobit pruty rovnoběžné s podložkou (modré pruty na obrázku 1.8). V orientaci, kdy buňka nezahrnovala prut, který by byl rovnoběžný s podložkou se však všechny z těchto buněk daly úspěšně vyrobit.



Obr. 1.8 Rozdílné sklony prutů jednotlivých typů buněk. Modré: 0°, Zelené: 35,3°, Žluté: 45°, Červené: 90° [22]

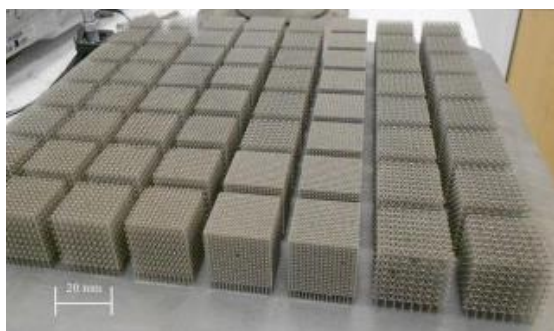
Vyrobené buňky byly následně podrobeny tlakovým zkouškám, při kterých bylo zjištěno, že struktury se svislými vzpěrami rovnoběžnými se směrem zatěžování mají lepší absorpční schopnosti než ty bez nich. Jednoznačně nejlepší mechanické vlastnosti pak prokázala struktura FBCCZ s nejvyšší relativní hustotou. Tento článek je pro tuto práci přínosný zejména proto, že ukazuje v jakých orientacích jsou jednotlivé struktury vyrobitelné.

**Tancogne-Dejean et al.** [23] pak zkoumali vlastnosti a chování BCC struktury z materiálu 316L při statickém a dynamickém tlakovém zatěžování, kdy porovnávali vzorky s různými relativními hustotami. Na základě tlakových zkoušek bylo zjištěno, že při relativní hustotě nad 30 % měla zatěžovací křivka lineární průběh. Dalším zjištěním bylo to, že měrná absorbovaná energie je přímo úměrná relativní hustotě. Potvrdil se také fakt, že chování BCC struktury při statickém a dynamickém zatěžování je značně odlišné.

Autoři následujícího článku se zaměřili i na jiné druhy zatížení, než je obvyklé, včetně zatížení smykem, proto je zde tento článek oproti předchozím nejvíce rozveden.

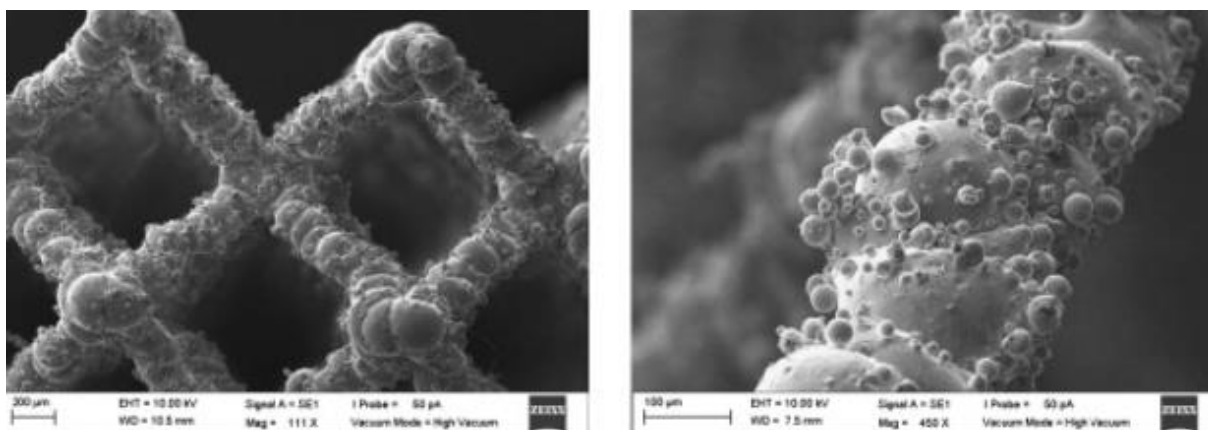
**Gümrük et al.** [3] ve své studii experimentálně zkoumali obecné mechanické vlastnosti mikro-prutových struktur z nerezové oceli vyráběných metodou SLM pro různé typy zatížení a různé okrajové podmínky. Zkoušky tlakem, tahem, smykem a kombinovaným namáháním při různých okrajových podmínkách provedli u tří typů mřížek – BCC, BCCZ a  $F_2$  BCC, což je buňka, která se skládá ze dvou BCC buněk, vzájemně pootočených o  $45^\circ$ . Všechny výsledky a srovnání jsou provedeny z hlediska relativní hustoty a velikosti a topologie buněk.

Pro testování byly zvoleny vzorky ve tvaru krychle o délce hrany 20 mm (viz obr. 1.9). Tyto krychlové bloky byly vyrobeny v různých konfiguracích tak, že se vždy měnila velikost a tvar buněk, tím pádem také relativní hustota.



*Obr. 1.9 Sada vzorků s různými velikostmi buněk [3]*

Průměr prutu byl stanoven o konstantní velikosti 0,2 mm, nicméně tato hodnota je u takto tenkého prutu spíše přibližná. Jak je vidět na obrázku 1.10, u mikro-prutových struktur se po výrobě vyskytují různé nedokonalosti v podobě proměnlivého průměru a natavených částic prášku na povrchu prutů. Tyto nedokonalosti jsou jedním z faktorů, které také ovlivňují mechanické vlastnosti těchto struktur.



*Obr. 1.10 Mikroskopické fotografie mřížkové struktury BCC (vlevo) a detailu prutu (vpravo) [3]*

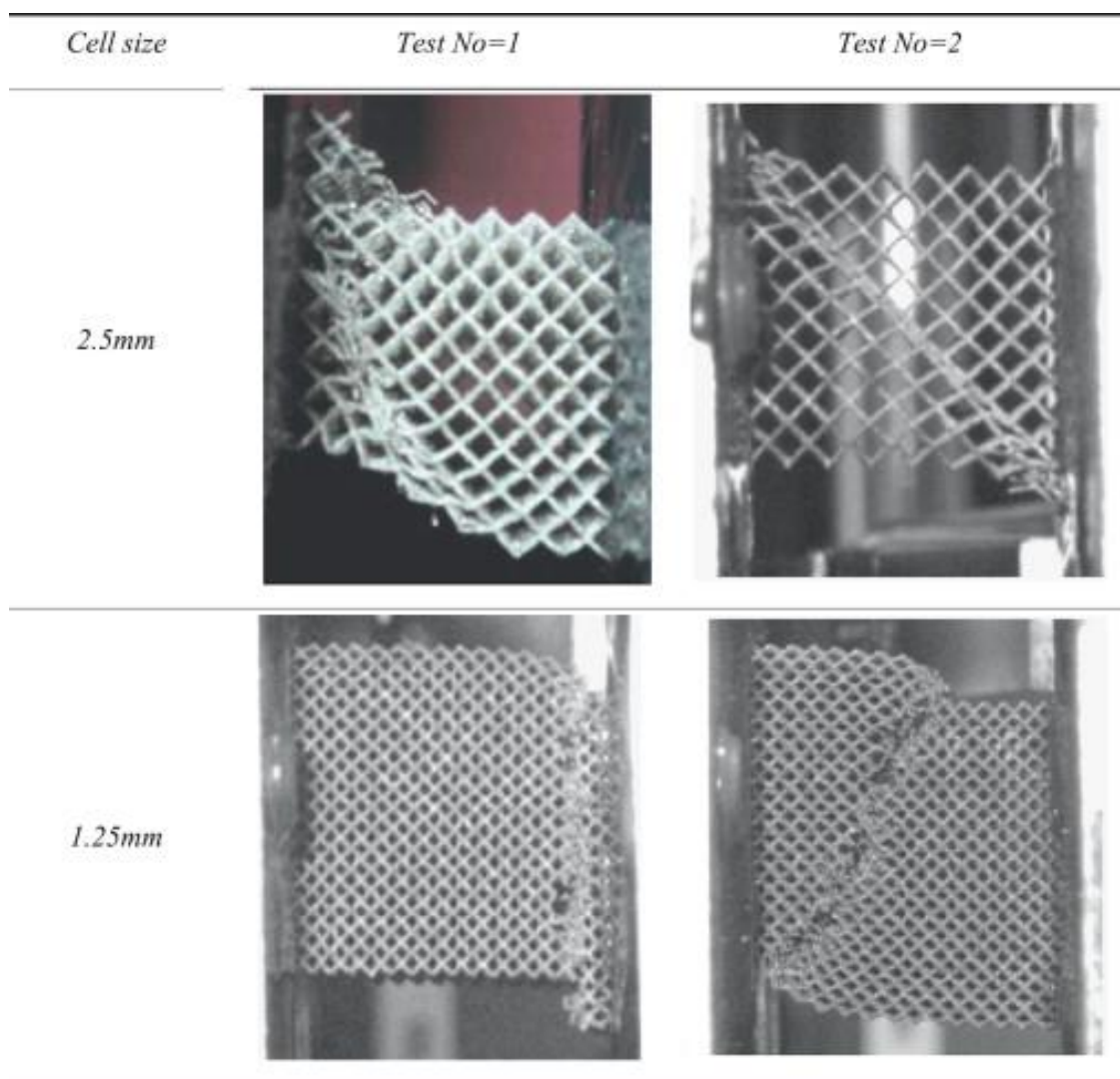
Testy byly provedeny na univerzálním testovacím stroji Instron 4024. První varianta tlakových testů probíhala pomocí plochých zatěžujících desek. Tlakové zkoušky byly realizovány i druhým způsobem a to tak, aby byla omezena možnost deformace a nedocházelo tak k vybočení. Druhá varianta zkoušky probíhala pomocí testovacího přípravku Arcan (viz kapitola 1.4.4). Pomocí testovacího zařízení Arcan byly provedeny také zkoušky



kombinované, tahové i smykové. Vzorky použité pro tyto testy byly s přípravkem spojeny pomocí lepidla.

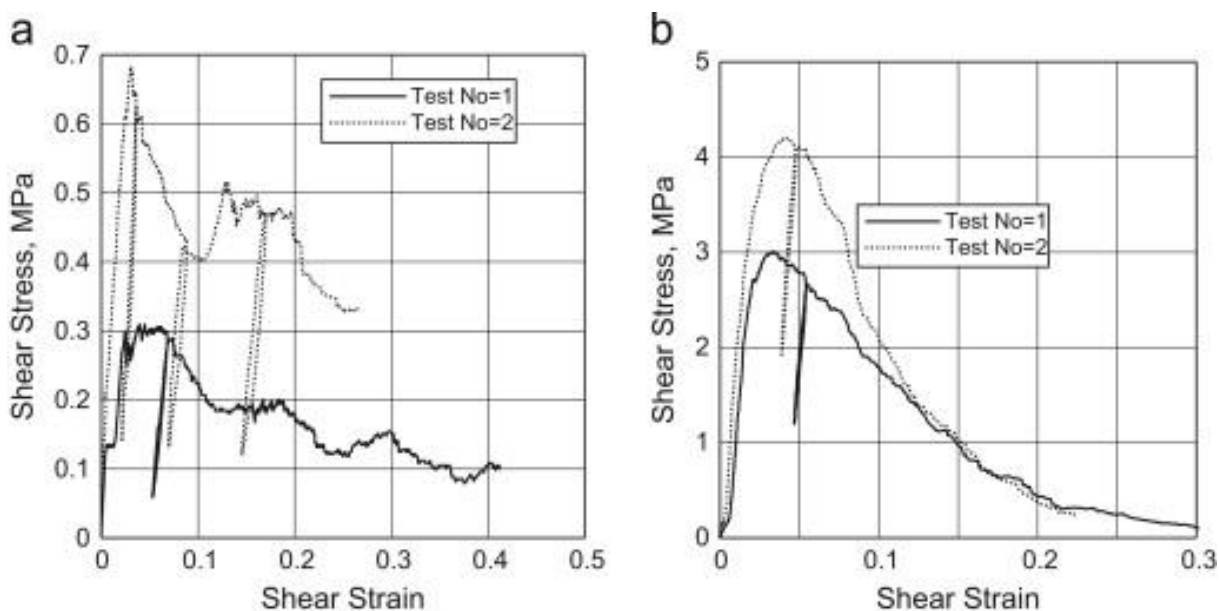
Tlakové i tahové zkoušky ukázaly výbornou opakovatelnost, tudíž se z výsledků těchto zkoušek daly vyvodit závěry, jako například to, že vzorky se svislými vzpěrami (BCCZ) vykazují lepší vlastnosti než vzorky bez nich (BCC). Zároveň bylo zjištěno, že mechanické vlastnosti struktur BCC, včetně modulu pružnosti silně závisí na okrajových podmínkách, kdežto BCCZ jimi nebyly téměř ovlivněny. Bylo také potvrzeno obecné pravidlo, že struktury s vyšší relativní hustotou v rámci jednoho typu buňky vykazují lepší vlastnosti než ty s relativní hustotou nižší.

Smykové zkoušky byly provedeny pouze pro BCC struktury s velikostí buněk 2,5 a 1,25 mm. Je zřejmé, že zkoušky smykem vykazují zcela odlišné výsledky než zkoušky tlakové. Dalším zjištěním je to, že při smykových zkouškách nebylo u těchto testů dosaženo dobré opakovatelnosti, což je zřejmé z obrázku 1.11. Důvodem této neopakovatelnosti může být citlivost počátečního selhání nebo nežádoucí účinky spojené s přilepením vzorku k aparatuře.



Obr. 1.11 Různé deformace vzorků při smykové zkoušce [3]

Na obrázku 1.12 jsou vyobrazeny výsledky smykových testů v diagramu napětí-deformace. Jistá neopakovatelnost je na první pohled zřejmá, nicméně směrnice křivky v oblasti elastických deformací se zdá být vždy v rámci jedné buňky velmi podobná. S ohledem pouze na chování struktury do první plastické deformace by se tedy zkouška dala brát do jisté míry jako dobře opakovatelná.



Obr. 1.12 Výsledky smykové zkoušky BCC struktur s velikostí buněk 2,5 mm (a) a 1,25 mm (b) [3]

## 1.4 METODY SMYKOVÉHO TESTOVÁNÍ

Modul pružnosti ve smyku je důležitou materiálovou konstantou, vyjádřenou jako poměr smykového napětí a deformace tímto napětím způsobené. Modul pružnosti ve smyku neboli Coulombův modul vyjadřuje pružné chování materiálu při zatěžování smykem.

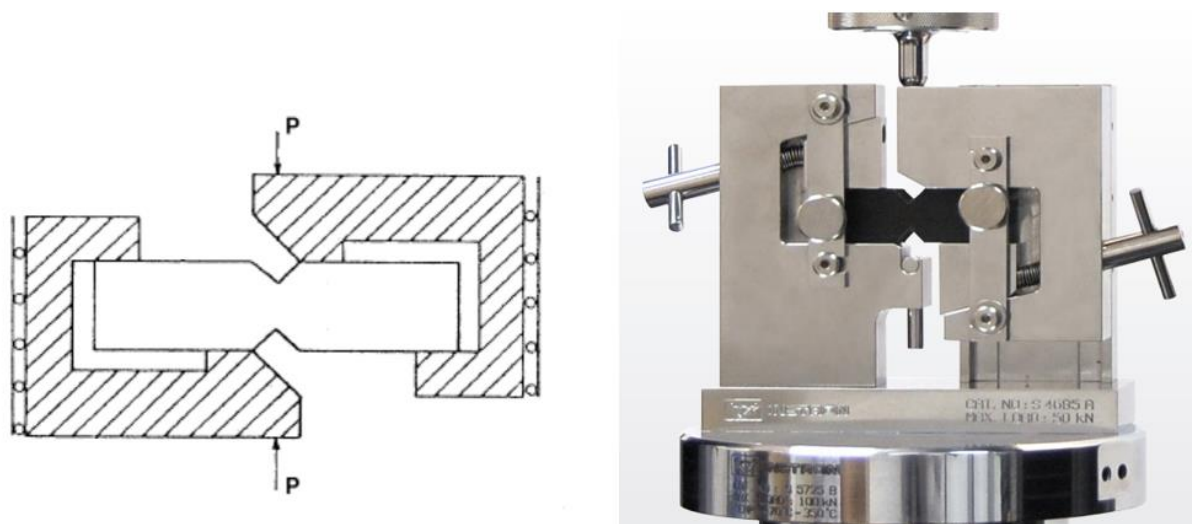
Modul pružnosti ve smyku  $G$  se u izotropních materiálů běžně neměří, protože lze vypočítat dle vzorce (1-4) odvozeného z rovnic Hookova zákona, kde  $E$  je modul pružnosti v tahu (Youngův modul) a  $\mu$  je Poissonovo číslo vyjádřeno jako poměr poměrného zúžení (kontrakce) a poměrného prodloužení (dilatace).

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (1-4)$$

V případech, kdy je materiál pórovitý, nebo heterogenní jako tomu je například u kompozitních materiálů, je analytický výpočet Coulombova modulu komplikovaný nebo vůbec není možný a chování materiálu při zatěžování smykem je tedy nutné zjistit experimentálně. V této kapitole budou popsány jednotlivé metody, které se zabývají testováním na smyk.

#### 1.4.1 METODA DLE NORMY ASTM D5379

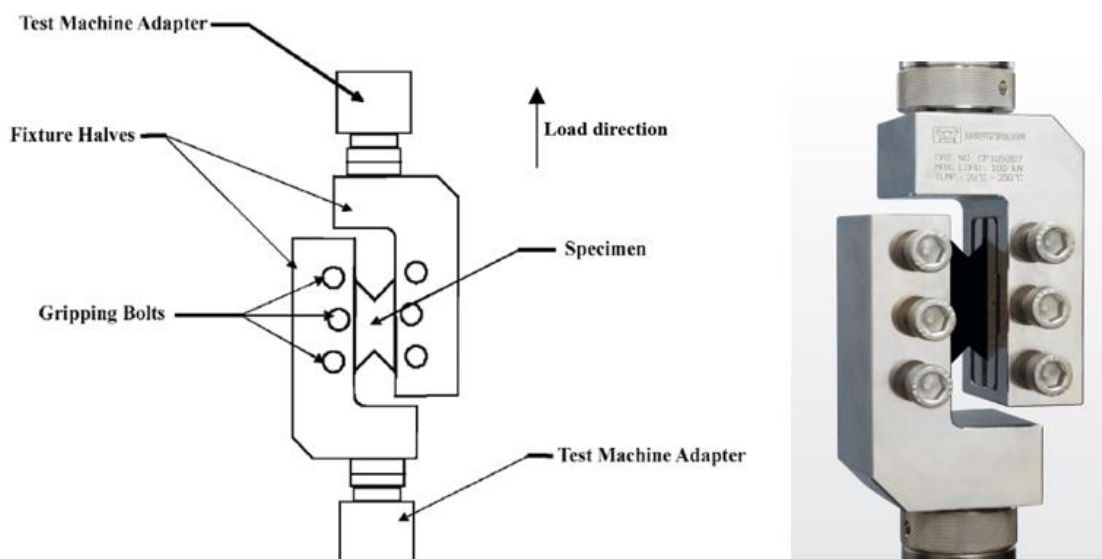
ASTM D5379 (viz obr. 1.13) je zkušební norma určená k měření smykových vlastností kompozitních materiálů. Tato zkušební metoda dokáže určit materiálové hodnoty jako je pevnost a modul pružnosti ve smyku. Obdélníkový vzorek o velké tloušťce se dvěma vruby je zatěžován ve speciálním přípravku, kdy je tlakem vyvozen smyk. [13]



Obr. 1.13 Schéma a fotografie metody ASTM D5379 [11][12]

#### 1.4.2 METODA DLE NORMY ASTM D7078

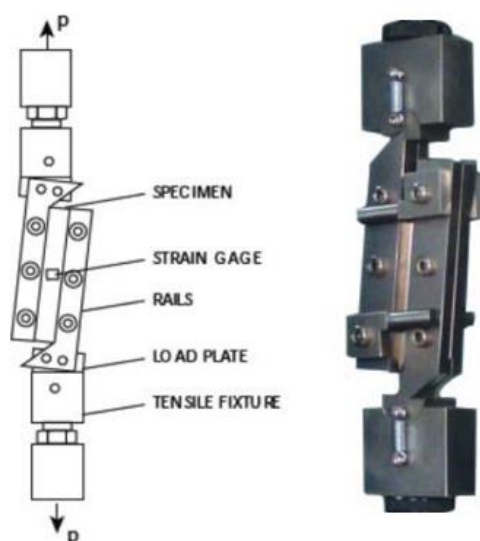
Norma ASTM D7078 je jistou modifikací normy ASTM D5379. Metoda je také určena k testování kompozitních materiálů. Testovacím vzorkem bývá opět obdélník o velké tloušťce se dvěma vruby. U této metody je vzorek ve speciálním přípravku zatěžován smykem, který je tentokrát vyvozen tahovou silou. Metoda dokáže podobně jako ASTM D5379 vyhodnotit materiálové hodnoty jako pevnost ve smyku a modul pružnosti ve smyku. (viz obr. 1.14) [15]



Obr. 1.14 Schéma a fotografie metody ASTM D7078 [11][12]

### 1.4.3 METODA DLE NORMY ASTM D4255

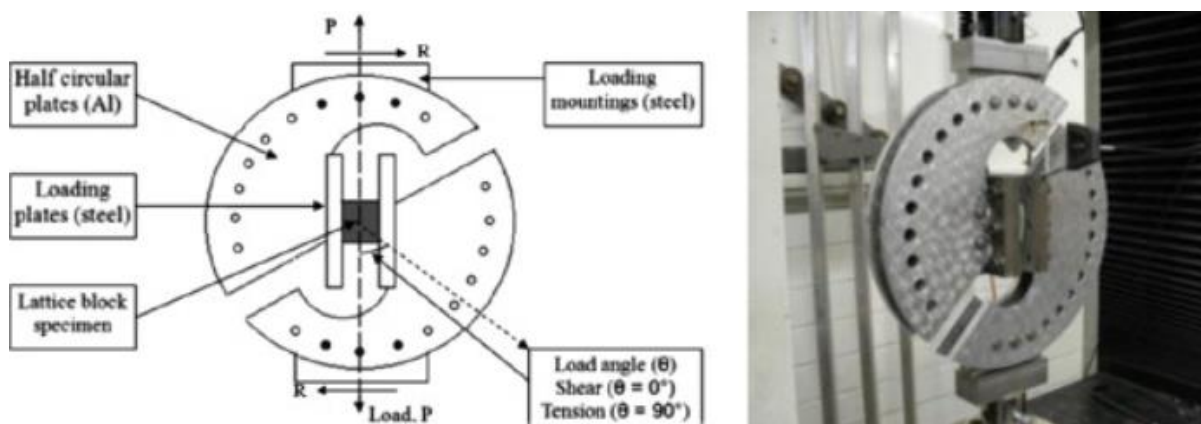
Tato metoda je opět určena k testování kompozitů. Metoda funguje na podobném principu jako ASTM D7078, kdy je smyk vyvozen tahovým zatížením, s tím rozdílem, že zde je vzorek mírně nakloněn vzhledem k jeho ose, což dovoluje se více přiblížit čistému smyku. Metoda opět dokáže zjistit modul pružnosti a pevnost ve smyku. Nevýhodou této metody oproti ostatním metodám je nutnost rozměrově většího vzorku. Jak je patrné ze schématu na obrázku 1.15, je nutné použít tenzometr. [16]



Obr. 1.15 Schéma a fotografie metody ASTM D4255 [16] [17]

### 1.4.4 ARCANŮV TEST

Arcanův test (viz obr. 1.16) vznikl z důvodu snahy vytvořit rovnoměrný stav napětí ve zkušební části vzorku. Přípravek Arcan se skládá ze dvou půlkruhových desek s otvory. Tyto otvory umožňují otočit aparaturu tak, že je možné zatěžovat vzorek v různých směrech. Tento přípravek tedy umožňuje zatěžovat vzorek tlakem, smykem i kombinovaně. Vzorek může být k přípravku podle situace připojen různými způsoby, například lepidlem nebo šrouby. K vyhodnocení mechanického napětí je žádoucí použít tenzometr. [3] [18]



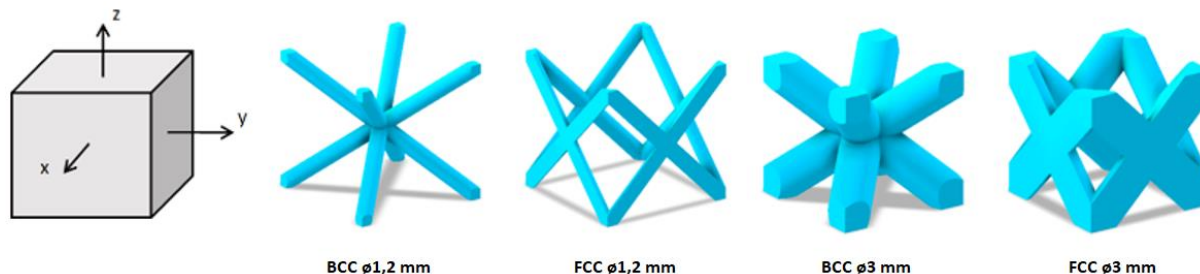
Obr. 1.16 Schéma a fotografie přípravku Arcan [3]

## 2 MATERIÁL A METODY

### 2.1 VOLBA MIKRO-PRUTOVÝCH STRUKTUR K TESTOVÁNÍ

Pro experiment byly vybrány na základě článku Learyho et al. (viz kapitola 1.3) a jiných mikro-prutové struktury BCC a FCC o délce hrany 10 mm a o velikostech průměru prutů 1,2 mm a 3 mm. Obě tyto struktury na základě Maxwellova čísla (viz kapitola 1.2) patří mezi ty prutové struktury, kde při zatěžování dominuje ohyb (*bending dominated*). BCC struktura je momentálně asi nejpoužívanější mikro-prutovou strukturou a tím pádem se právě ona nejvíce testuje a existuje o ní nejvíce informací co se týče mechanických vlastností (pracuje se s ní ve všech třech člancích popsaných v kapitole 1.3). To je dáno mimo jiné tím, že je v makroskopickém měřítku relativně izotropní. Izotropním tělesem můžeme označit to těleso, jehož vlastnosti se nemění v závislosti na směru. U struktury BCC je tedy zřejmé, že pokud ji budeme zatěžovat v jednom ze základních směrů ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), výsledky by měly být v rámci určité tolerance vždy stejné, to se u struktury FCC říct nedá.

Na základě předchozích zkušeností z pracoviště, kde byly vzorky vyráběny lze tvrdit, že nejmenší možný výrobitelný průměr prutu z materiálu AlSi10Mg je 0,6 mm. Vzhledem k tomu, že buňka FCC (viz obr. 1.2) obsahuje pruty, které jsou podélně oříznuté v polovině, byl zvolen průměr prutů 1,2 mm. Takto malý průměr lze sice vyrobit, předpokládá se však poměrně velký vliv technologie na jeho vlastnosti. Na druhé straně u prutů s průměrem 3 mm a vyšších se tento vliv považuje spíše jako zanedbatelný.



Obr. 2.1 Vybrané struktury k testování

### 2.2 NÁVRH TVARU TESTOVACÍCH VZORKŮ

Při návrhu experimentu se vycházelo ze zmíněných, již používaných metod smykového testování. Všechny tyto zmíněné metody jsou založeny na přípravcích, do kterých je vzorek upnut způsoby, jako je připojení šrouby nebo lepidlem. Připojení šrouby ani lepidlem v případě našich zvolených stuktur vzhledem k jejich tvarům a velikostem není vhodné. Oba tyto způsoby upnutí by byly velmi náročné na realizaci a také by nebylo stoprocentně ověřitelné zda by došlo ke správnosti testů, kvůli případné malé tuhosti spojení. Aby nedošlo k těmto pochybnostem, byl vzorek navržen jako celek struktury spojené s přípravkem. Toto je možné díky aditivním technologiím a zaručuje to co možná nejvyšší tuhost spojení.

Nejvhodnější metodou pro náš případ se ukázala díky své jednoduchosti metoda testování dle normy ASTM D7078 (viz kapitola 1.4.2). Právě ona byla inspirací při prvotním návrhu vzorku. Prvotní návrh (viz obr. 2.2), jak by mohl vzorek vypadat téměř kopíroval tvar přípravku, kterého využívá tato norma.



*Obr. 2.2 První verze vzorku (vlevo) a přípravek podle normy ASTM D7078 (vpravo) [12]*

Prvotní verze vzorku se zdá na první pohled v pořádku, nicméně muselo dojít k určitým optimalizacím, které mají zaručovat jeho vyrobiteľnosť a funkčnost. Prvním úkolem k optimalizaci bylo dosáhnout toho, aby se vzorek dal vyrobiť s čo najmenším použitím podpurného materiálu. Metódou SLM se nedají bez podpor vyrobiť plochy rovnoběžné s podložkou, měly by s ní přinejlepším svírat úhel větší než  $45^\circ$ . Aby bylo možné vzorek vyrobiť bez podpor, byl navržen vzorek se zkosnými hranami (viz obr. 2.3).



*Obr. 2.3 První optimalizace vzorku*



Dalšími požadavky na vzorek byla minimalizace materiálu nutného pro výrobu a uživatelsky přívětivé upínání do testovacího zařízení. Tím je myšlen návrh upínacích ploch, které jsou jasně odděleny od zbytku přípravku a představují jakýsi doraz k vymezení polohy upínacích kleští.

Na obrázku 2.4 lze vidět verzi přípravku, která má na obou stranách stopky pro upnutí a zdá se být poměrně tuhá, nicméně se nejví jako optimální z ekonomických důvodů. Na vzorek je v tomto případě použito zbytečně velké množství materiálu a výrobní čas by byl příliš dlouhý.



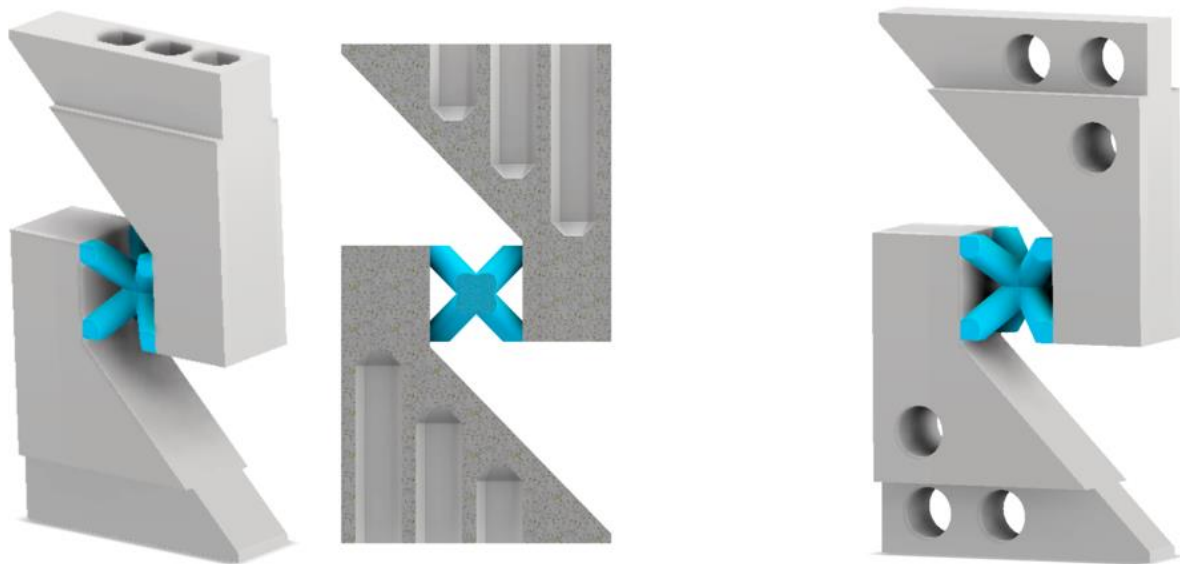
*Obr. 2.4 Neodlehčená verze vzorku s hranolem pro upnutí*

Osazení pro přesné upnutí bylo tedy navrženo jiným způsobem, který je znázorněn na obrázku 2.5. Hloubka osazení je 1 mm na každé straně a je zhotoveno do délky 7 mm od horní (respektive spodní) hrany. Tato úprava, i když došlo k odebrání materiálu, nemá zásadní vliv na tuhost vzorku, toto bylo ověřeno MKP výpočtem.



*Obr. 2.5 Neodlehčená verze vzorku s osazením pro upnutí*

Při návrhu odlehčení přípravku byly v základu uvažovány dvě varianty provedení (viz obr. 2.6). První variantou byly díry podélně se směrem zatěžování, druhou variantou díry kolmo na směr zatěžování.



Obr. 2.6 Varianty odlehčení vzorků 1 (vlevo) a 2 (vpravo)

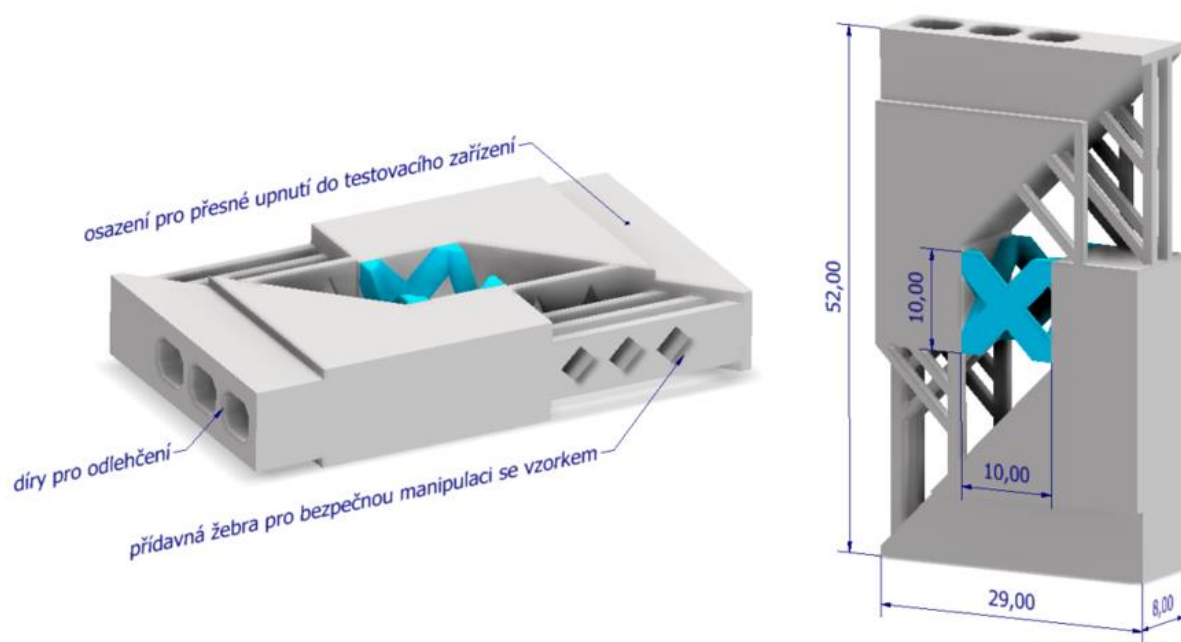
MKP analýza potvrdila očekávání, že varianta 1 s podélnými děrami ovlivnila výsledky zatěžování v porovnání s neodlehčenou verzí méně, než varianta 2 s příčnými děrami. Tuhost vzorku byla v tomto případě ovlivněna zanedbatelně. Nakonec byla tedy zvolena varianta 1 se třemi čtvercovými děrami o velikosti 5 x 4 mm. Hloubky děr jsou 8, 14 a 20 mm. Samotný jeden přípravek (není myšleno celý vzorek) byl odlehčen oproti vzorku po první optimalizaci (viz obr. 2.3) z původní hmotnosti 13,6 gramů na hmotnost 11,7 gramů. Vzhledem k množství vzorků, které se budou vyrábět, lze toto odlehčení považovat za přínosné. Celkově bylo ušetřeno bezmála 170 g materiálu.

Aby byly vzorky vyrobitelné a aby se s nimi dalo poté bezproblémově manipulovat, bylo nutné spojit přípravky přídatnými žebry (viz obr. 2.7), které měly za úkol držet vzorek pohromadě při odřezávání od podložky a odstraňování podpor.

Vzhledem k tomu, že bylo v plánu vyrábět vzorky v horizontálním i vertikálním směru, nebylo možné pro všechny vzorky kvůli jejich vyrobitelnosti bez podpor navrhnout univerzální žebra.

Na obrázku 2.7 jsou zobrazeny již finální vzorky struktury FCC o průměru prutu 3 mm v obou orientacích tak, jak se budou vyrábět. Jsou zde také označeny jednotlivé části vzorků, jejichž postup návrhu byl popsán v této kapitole. Na vertikálním vzorku jsou zakótovány hlavní rozměry. Vzorky se neliší ničím jiným, než orientací struktury a tvarem žeber.





Obr. 2.7 Finální podoba testovacích vzorků

## 2.3 ZAŘÍZENÍ PRO VÝROBU VZORKŮ

Výroba probíhala pomocí zařízení SLM 280HL (viz obr. 2.8). Toto zařízení je určeno pro výrobu středně velkých dílů. Stroj poskytuje výrobní prostor o velikosti 280 x 280 x 350 mm, maximální výkon laseru je 400 W a skenovací rychlost může dosahovat až 1000 mm/s. Tloušťka vrstvy může být nastavena v rozmezí 20 až 100  $\mu\text{m}$ . [20]

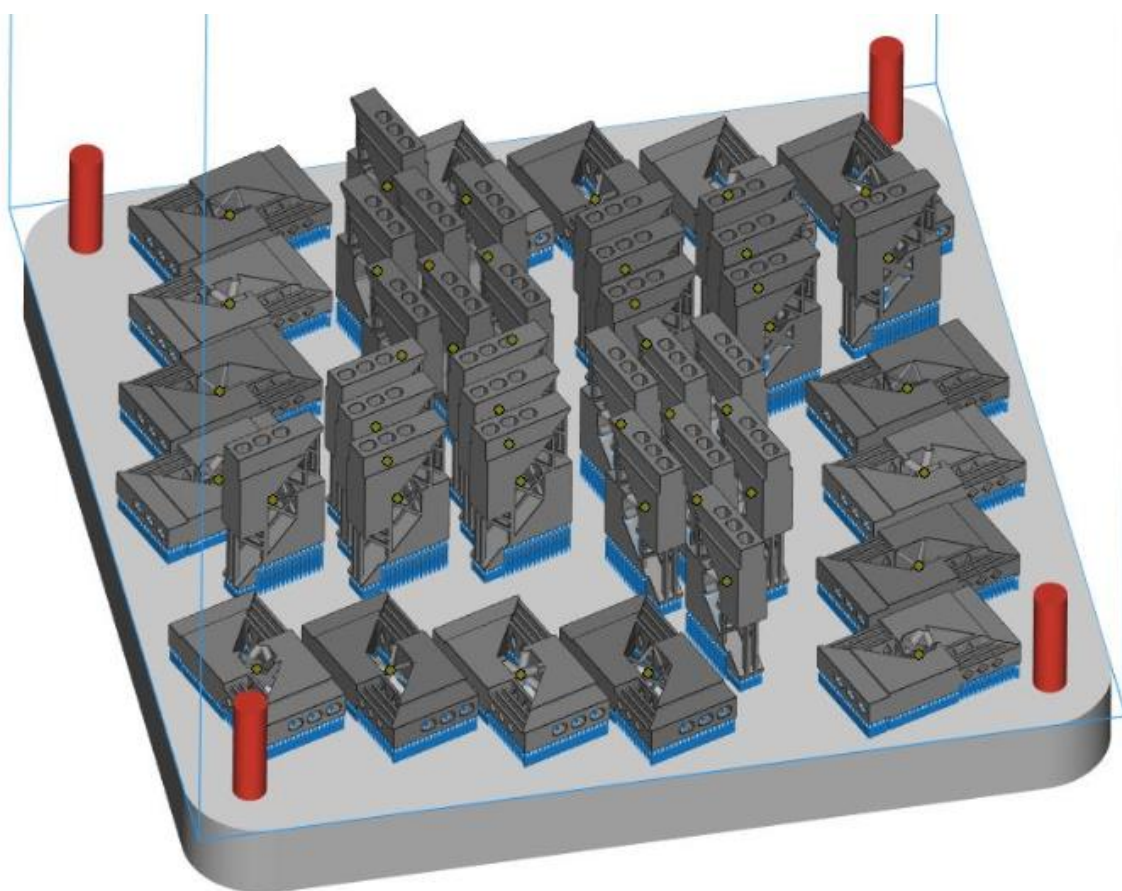


Obr. 2.8 Zařízení SLM 280HL [20]

## 2.4 PŘÍPRAVA A VÝROBA VZORKŮ

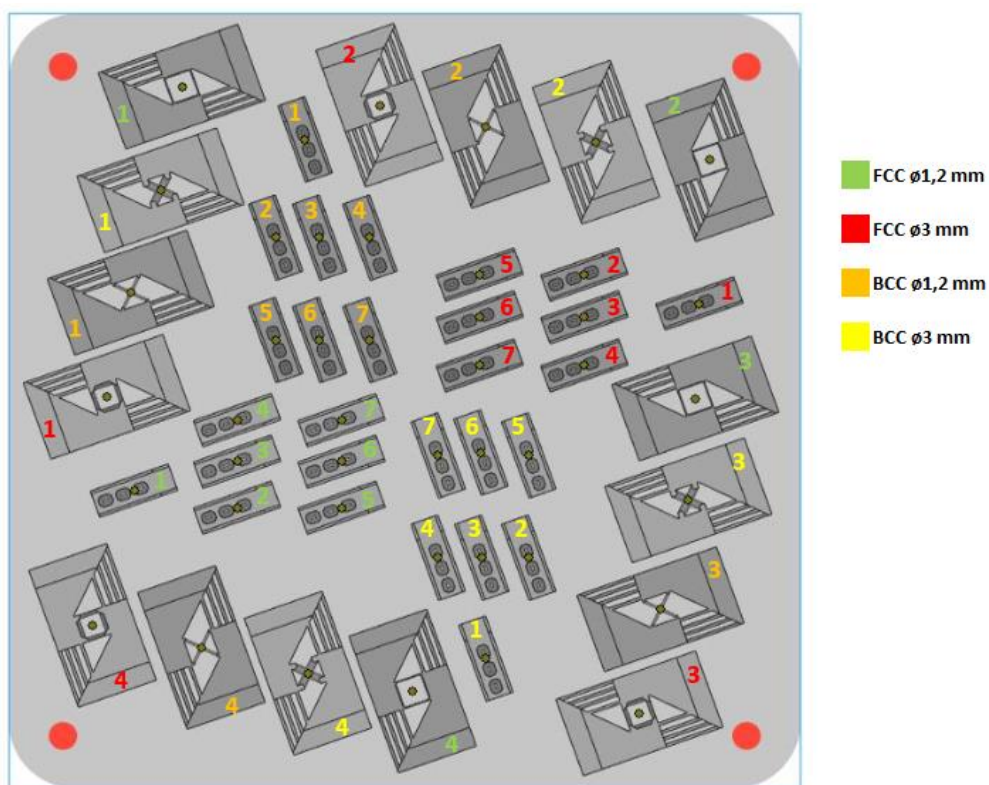
Pro výrobu vzorků byl zvolen běžně používaný prášek z hliníkové slitiny AlSi10Mg. Tento materiál je původně používán ve slévárenství a je dobře tepelně zpracovatelný.

Jakmile byly připraveny finální CAD modely vzorků, byla z nich vyexportována STL data, která byla dále zpracována v softwaru Materialise Magics 22. Na obrázku 2.9 je ukázka, jak probíhala příprava dat pro tisk v tomto softwaru. Všechny vzorky jsou umístěny na podporách o výšce 5 mm, aby se při odřezávání vzorků od podložky bez problému vešel pilový pás mezi vzorek a podložku a nebyly tak vzorky poškozeny. Blokované a čárové podpory byly prokládány podporami ve tvaru válečků, které měly za úkol odvádět teplo z materiálu a zabránit deformaci v důsledku zbytkového napětí, které vzniká při výrobě. Červené válce v rozích znázorňují prostor pro šrouby sloužící pro upevnění podložky.



Obr. 2.9 Příprava dat pro tisk v softwaru Materialise Magics 22

Určitou roli může u každého vzorku s ohledem na jeho vlastnosti kvůli faktorům, jako je směr rozprostírání prášku a směr proudu inertního plynu hrát i to, na kterém místě platformy byl vzorek vyráběn. Pro přehlednost došlo k očíslování a popsání jednotlivých vzorků podle umístění na podložce. To je znázorněno na obrázku 2.10. Zeleně jsou označeny struktury FCC s průměrem prutu 1,2 mm, červeně FCC struktury s průměrem prutu 3 mm, oranžově BCC struktury s průměrem prutu 1,2 mm a žlutě BCC struktury s průměrem prutu 3 mm.



Obr. 2.10 Znázornění rozmístění vzorků na platformě

Bylo vyrobeno celkem 44 vzorků. Následující tabulka ukazuje, které vzorky se budou testovat na zařízení Imada MX2-2500N (viz kapitola 2.5.2) a které na zařízení Zwick/Roell Z250 (viz kapitola 2.5.1). Z každé série vzorků vyráběných vertikálně a horizontálně byl vyroben jeden záložní vzorek navíc.

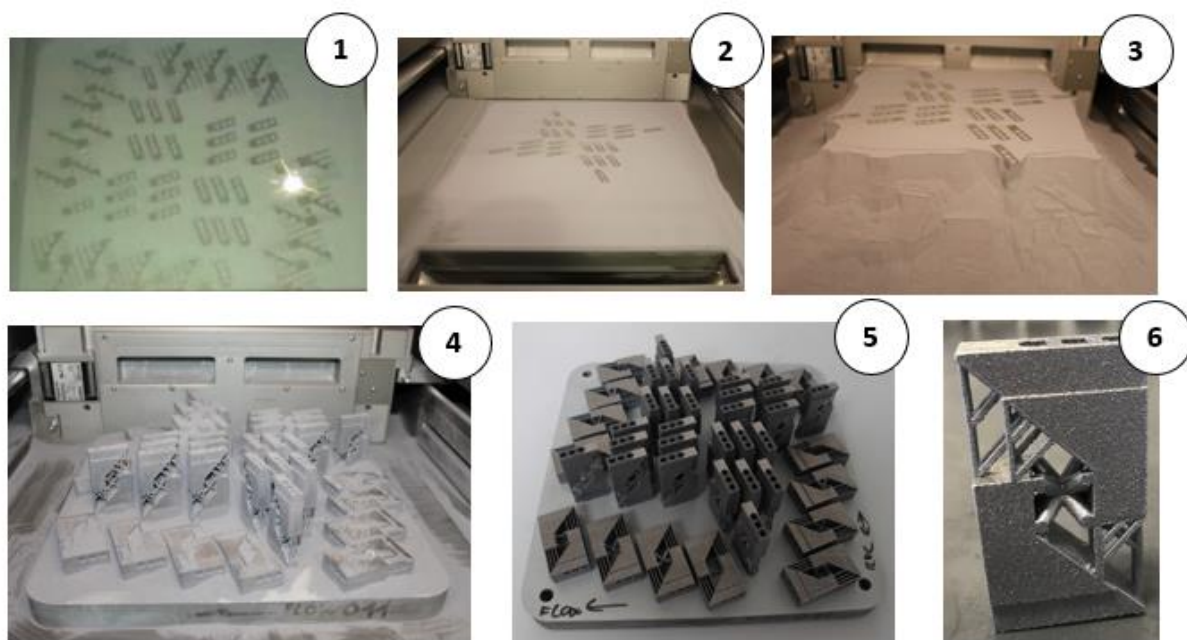
Tabulka 1 Přehled vyrobených vzorků k testování

Orientace buňky	Typ struktury	Průměr prutu [mm]	Relativní hustota [-]	Vzorky č.	Testovací zařízení
Vertikální	BCC	1,2	0,069	2, 3, 7	IMADA
Vertikální	FCC	1,2	0,057	2, 3, 7	IMADA
Horizontální	BCC	1,2	0,069	2, 3, 4	IMADA
Horizontální	FCC	1,2	0,057	1, 2, 4	IMADA
Vertikální	BCC	3	0,36	1, 2, 7	IMADA
Vertikální	FCC	3	0,29	1, 2, 7	IMADA
Horizontální	BCC	3	0,36	1, 2, 4	IMADA
Horizontální	FCC	3	0,29	1, 2, 4	IMADA
Vertikální	BCC	1,2	0,069	4, 5, 6	Zwick
Vertikální	FCC	1,2	0,057	4, 5, 6	Zwick
Vertikální	BCC	3	0,36	4, 5, 6	Zwick
Vertikální	FCC	3	0,29	4, 5, 6	Zwick

K tisku byla použita platforma o rozměrech 280 x 280 mm, která byla přehřátá na 150 °C. Proces výroby probíhal v dusíkové atmosféře. Celkový počet vrstev byl 1090 a stavba trvala přibližně 19 hodin 30 minut.

Výroba probíhala za standartních procesních parametrů od výrobce:

- Výkon laseru: 350 W
- Skenovací rychlost: 930 mm/s
- Rozteč skenování: 0,17  $\mu\text{m}$
- Tloušťka vrstvy: 50  $\mu\text{m}$

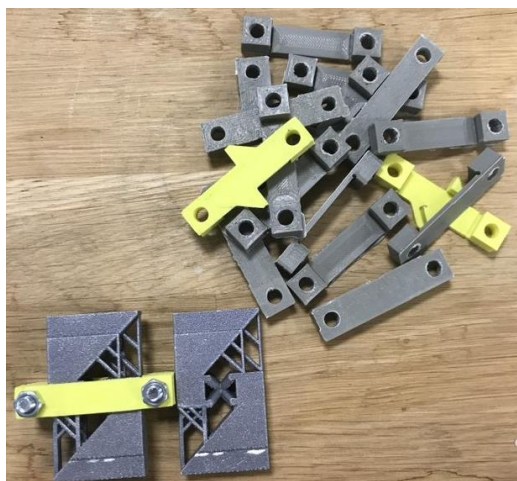


Obr. 2.11 Jednotlivé fáze výroby vzorků. 1–výroba, 2–platforma bezprostředně po výrobě, 3–vysunutá platforma, 4–proces odstraňování prášku, 5–očištěná platforma, 6–finální opracovaný vzorek

Na obrázku 2.11 jsou zachyceny jednotlivé fáze výroby. Fáze 1 ukazuje proces výroby ve chvíli, kdy byly jednotlivé vrstvy spékány laserem. V dalším kroku je zachycena platforma bezprostředně po skončení výroby. Po zchládnutí stavby byla platforma vysunuta nahoru a následně probíhalo odstraňování nenataveného prášku. Prášek, který se nepotřeboval na samotnou výrobu byl přeset a použit pro další výrobu. Ve fázi s číslem 5 je stavba vyobrazena již očištěna od prášku. Dalším nutným krokem bylo již zmíněné odřezání vzorků od platformy, což bylo provedeno pomocí horizontální pásové pily. Jakmile byly vzorky odřezány, bylo nutné je očistit pomocí kleští a dalších nástrojů od podpěr a následně dobrousit zbylé povrchové nerovnosti tak, aby bylo docíleno vzorku v takovém stavu, jako na posledním obrázku s číslem 6.

Přídavná žebra byla zatím záměrně ponechána, aby nedošlo při manipulaci se vzorky k jejich porušení. Tato žebra byla odstraněna až těsně před upnutím do testovacího zařízení. Některé vzorky byly natolik křehké, že hrozilo jejich poškození i při odstraňování těchto podpěrných žebířů. Z toho důvodu byly 3D tiskem vyrobeny plastové pásy (viz obr. 2.12), které měly za úkol vzorky zpevnit, aby k tomuto porušení opravdu nedošlo. Tyto pásy byly vždy odstraněny až po upnutí do testovacího zařízení. Tento postup se ukázal jako úspěšný, vzorky nebyly při manipulaci porušeny.





*Obr. 2.12 Pásky pro zpevnění vzorků vyrobené plastovým 3D tiskem*

## 2.5 TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ

### 2.5.1 ZWICK/ROELL Z250

Zwick/Roell Z250 (viz obr. 2.13) je testovací zařízení, kde je přenos síly uskutečňován prostřednictvím centrálního kuličkového šroubu. Pohyblivá příčka zajišťuje boční vedení osy zkoušky a není vystavena ohybovému zatížení. Tento stroj je mimo klasické tahové, tlakové a ohybové zkoušky vhodný například také k nízkocyklovým únavovým testům, zkouškám mechanickým lomem, nebo ke zkoumání interkrystalických reakcí a chování mikrostrukturního materiálu. Stroj je schopen pracovat se zatížením až 250 kN, rychlost testu může být nastavena na hodnoty od 0,0005 do 600 mm/min. [21]

Vzhledem k tomu, že se jedná o profesionální zařízení, očekávají se od něj v této práci spolehlivé výsledky.



*Obr. 2.13 Zařízení Zwick/Roell Z250 [21]*

### 2.5.2 IMADA MX2–2500N

Imada MX2-2500N (viz obr. 2.14) je zařízení pro měření síly pracující v kombinaci s digitálním nebo mechanickým snímačem síly. Dokáže měřit tlakovou a tahovou sílu. Stroj je schopen pracovat se silou až 2500 N, rozpětí rychlosti se pohybuje od 10 do 300 mm/min.

Toto zařízení není považováno za profesionální a je určeno primárně k výukovým účelům. Jedním z přínosů práce je ověřit vhodnost tohoto zařízení pro další testování podobného charakteru. Vzhledem k jednoduchosti použití tohoto zařízení byly s jeho pomocí otestovány všechny typy vyrobených vzorků. Výsledky z tohoto zařízení budou relativně porovnávány mezi sebou, jejich absolutní hodnoty pak budou porovnávány s výsledky získanými z profesionálního zařízení, popsaného v předchozí kapitole.

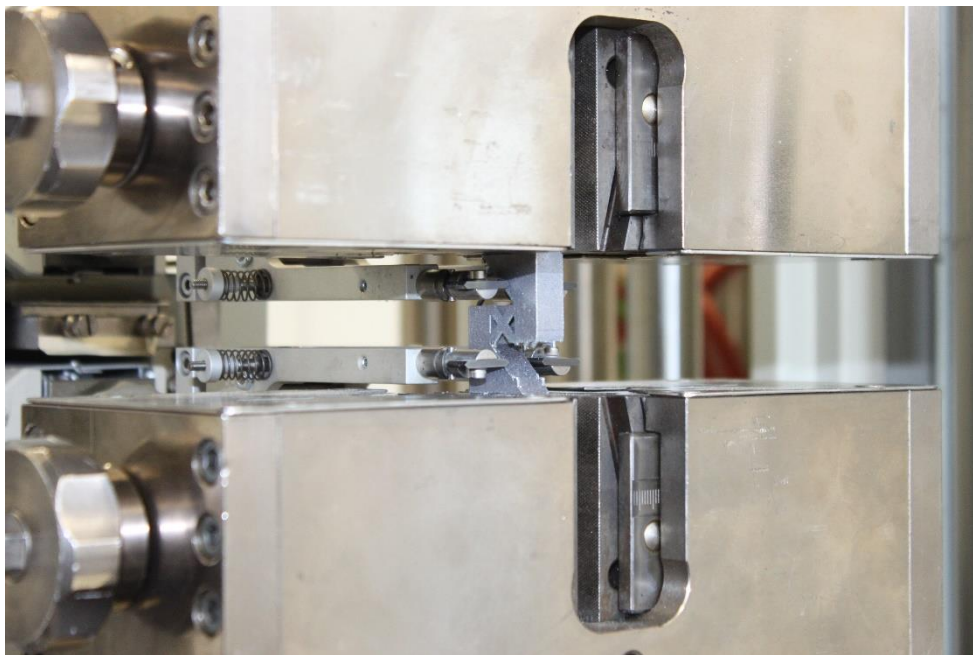


Obr. 2.14 Zařízení Imada MX2-2500N

## 2.6 PRŮBĚH TESTOVÁNÍ

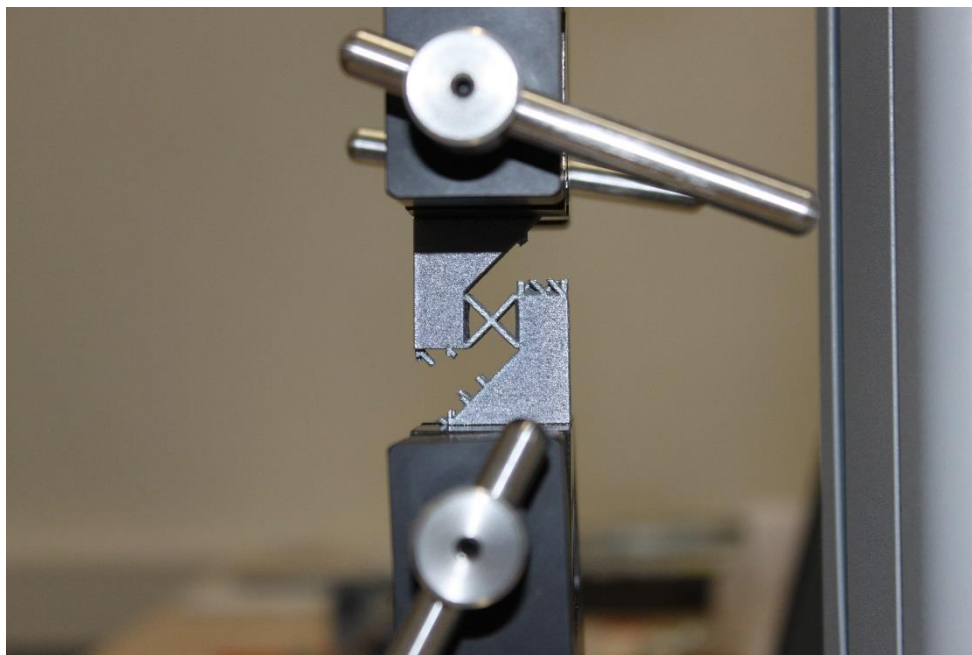
Testování proběhlo na dvou zařízeních viz předchozí kapitola. V této kapitole bude popsáno, za jakých podmínek na každém ze dvou zařízení testování probíhalo. Na obou zařízeních bylo smyku docíleno tahovým zatížením.

Na zařízení Zwick/Roell Z250 probíhal test dle normy ČSN EN ISO 6892-1 (2021). Vzorek byl zatížen silou předpětí o velikosti 2 N. Rychlost posuvu byla nastavena na 1 mm/min. K měření prodloužení byl použit extenzometr MultiXtens, jehož umístění lze vidět na obrázku 2.15. Výstupem testu je závislost síly na prodloužení. Na tomto zařízení byly testovány pouze vertikální vzorky v běžné orientaci struktur viz tabulka 1.



*Obr. 2.15 Upnutý vzorek do testovacího zařízení Zwick/Roell Z250*

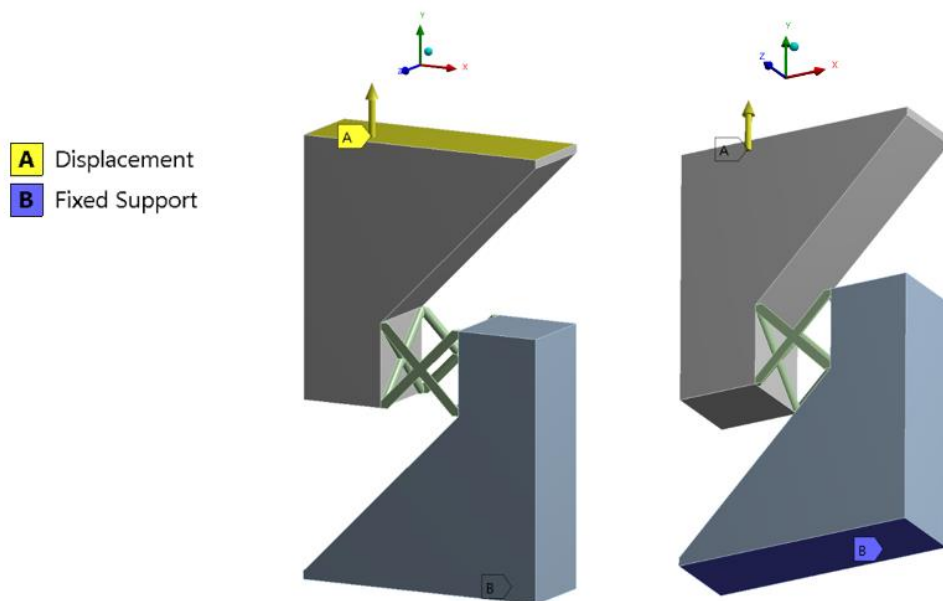
Na zařízení Imada MX2-2500N byla nastavena rychlost posuvu na 10 mm/min. Toto zařízení není vybaveno snímáním polohy. Výstupem testu je závislost síly na čase, prodloužení je tedy nutné dopočítat z rychlosti. Na tomto zařízení již byly testovány všechny vzorky ve všech orientacích struktur viz tabulka 1. Na obrázku 2.16 lze vidět jakým způsobem byl vzorek upnut do zařízení.



*Obr. 2.16 Upnutý vzorek do testovacího zařízení IMADA MX-2500N*

## 2.7 NASTAVENÍ MKP

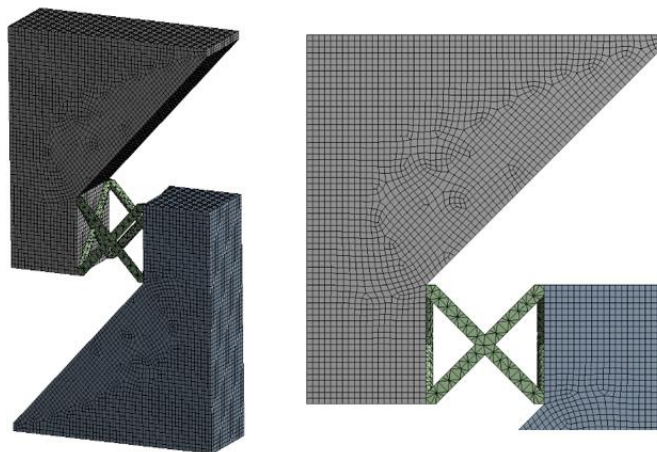
V programu Ansys Workbench 2019 byly všechny typy vzorků podrobeny MKP analýze, kde byly zvoleny okrajové podmínky tak, aby se co nejvíce přiblížily reálným zkouškám. Jak lze vidět na obrázku 2.17, spodní plocha B byla vždy nastavena jako pevná a na horní ploše s označením A byl nastaven posuv o velikosti 0,01 mm v kladném směru osy y. Hodnota posuvu byla zvolena tak, ať lze s jistotou říct, že nebyla překročena mez kluzu a výpočet probíhal v oblasti elastických deformací.



Obr. 2.17 Okrajové podmínky MKP

Pozorovanou veličinou byla při MKP výpočtech reakční síla ve vazbách při daném posuvu a výstupem byla závislost síly na prodloužení.

MKP síť (viz obr. 2.18) byla vytvořena za pomoci tetrahedrálních prvků o velikosti 0,5 mm. K vygenerování sítě byla použita metoda *multizone*, která rozdělí tělesa na základní tvary a vyplní je mapovanou sítí. Počet elementů sítě se pro jednotlivé úlohy pohyboval okolo 100 000, počet uzlů byl vždy kolem 400 000. Kontakty mezi strukturou a přípravkem byly nastaveny na *bonded*.



Obr. 2.18 Síťování vzorku



MKP výpočty byly provedeny na původních neodlehčených vzorcích bez osazení (viz obr. 2.15), nicméně bylo ověřeno, že pokud se analýza provedla na CAD modelech finálních vzorků, které byly reálně vyrobeny a testovány, odchylky ve výsledcích byly zanedbatelné, zpravidla nepřesahovaly pět procent.

## 2.8 OČEKÁVANÉ VÝSLEDKY K VYHODNOCOVÁNÍ

V této kapitole je po bodech nastíněno, co bude na základě získaných výsledků hlavními předměty diskuze.

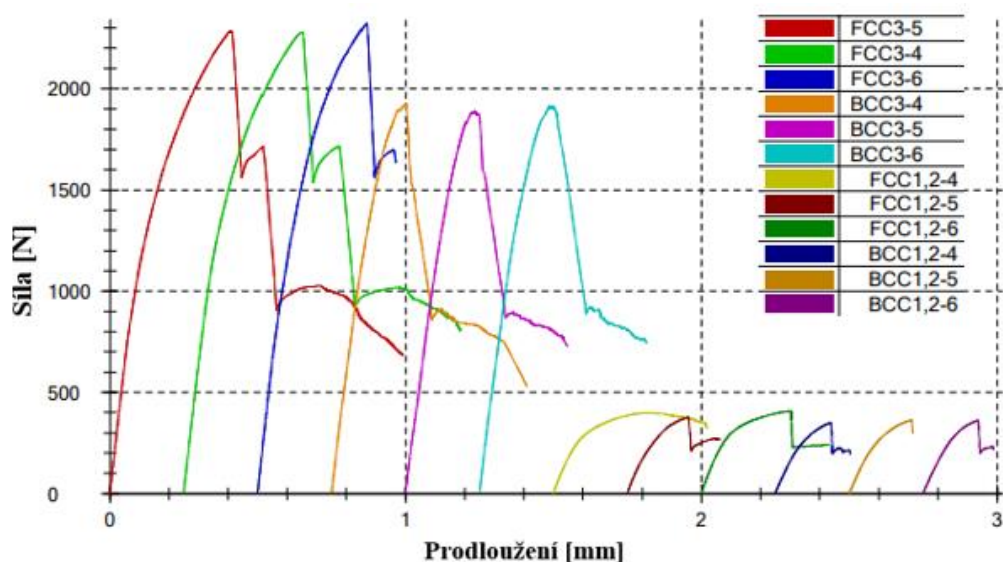
- Porovnání vlastností struktur v závislosti na průměru prutů
- Porovnání vlastností struktur v závislosti na typu struktury
- Vyhodnocení, zda má průměr prutů vliv na to, jak moc budou vlastnosti buňky ovlivněny výrobní technologií SLM
- Porovnání vlastností struktur v závislosti na směru zatížení
- Porovnání výsledků z různých zařízení s výsledky MKP výpočtů a zhodnocení vhodnosti testovacích zařízení pro experimenty tohoto typu
- Porovnání vlastností struktur v závislosti na pozici, kde na platformě byly vyráběny

### 3 VÝSLEDKY

Výsledky fyzických testů i MKP analýzy jsou zaměřeny na pružné chování materiálu. Vzhledem k předpokladu, že zvolený přípravek není ideálně tuhý, pravděpodobně nedošlo při testování k čistému smyku a nelze z výsledků přímo vyvodit smykový modul pružnosti struktury. Primárně zjišťovanou hodnotou všech testů byla tedy tuhostní konstanta  $k$ , která do jisté míry odhaduje chování struktury při zatěžování smykem. U výsledků reálných zkoušek na obou zařízeních byla oblast lineárních elastických deformací proložena přímkou podle jejíž směrnice byla vždy vyvozena hodnota této konstanty v kN/mm.

#### 3.1 VÝSLEDKY ZE ZAŘÍZENÍ ZWICK/ROELL Z250

Na obrázku 3.1 lze vidět graf závislosti síla-prodloužení vzorků testovaných na tomto zařízení. V tabulce 2 jsou vyčísleny hodnoty tuhostní konstanty jednotlivých vzorků.



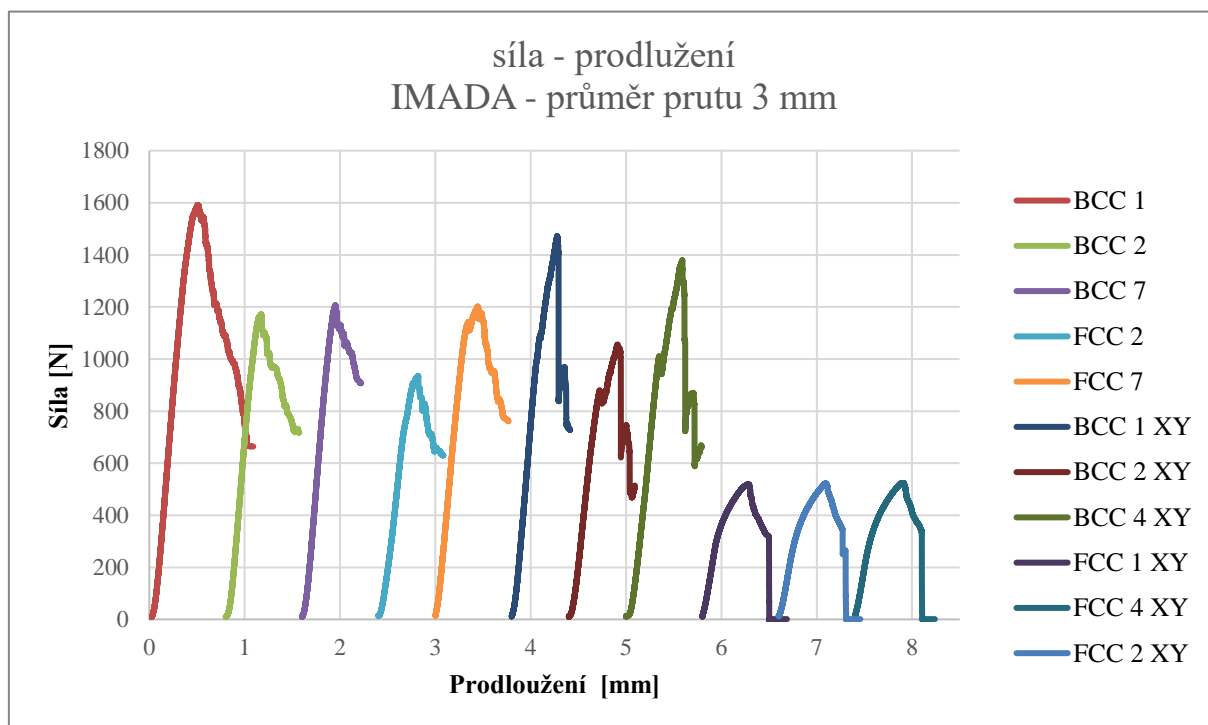
Obr. 3.1 Graf síla-prodloužení vzorků testovaných na zařízení Zwick/Roell Z250

Tabulka 2 Přehled výsledků ze zařízení Zwick/Roell Z250

Orientace buňky	Vzorek	Průměr prutu [mm]	$k$ [kN/mm]	Průměrná hodnota $k$
Vertikální	FCC 5	3	12,74	13,03
Vertikální	FCC 4	3	12,71	
Vertikální	FCC 6	3	13,62	
Vertikální	BCC 4	3	12,44	12,21
Vertikální	BCC 5	3	11,91	
Vertikální	BCC 6	3	12,29	
Vertikální	FCC 4	1,2	3,46	3,44
Vertikální	FCC 5	1,2	3,20	
Vertikální	FCC 6	1,2	3,68	
Vertikální	BCC 4	1,2	3,08	3,09
Vertikální	BCC 5	1,2	3,13	
Vertikální	BCC 6	1,2	3,07	

### 3.2 VÝSLEDKY ZE ZAŘÍZENÍ IMADA MX2-2500N

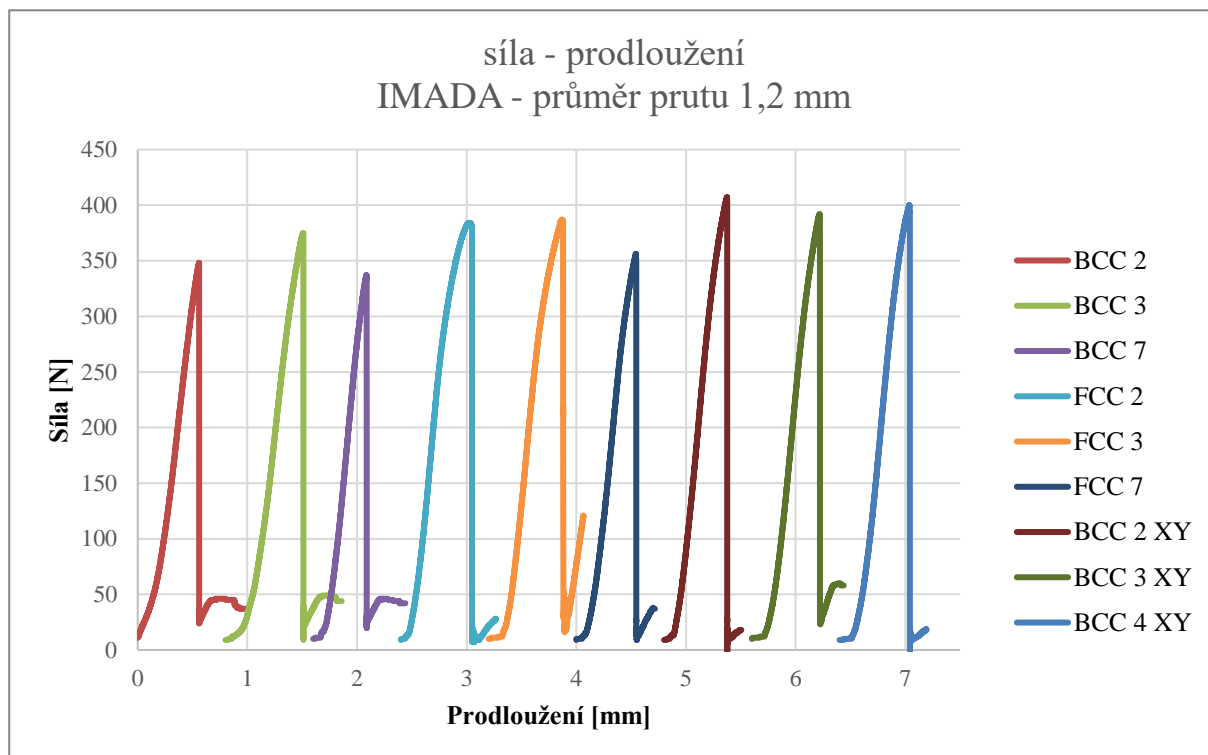
Vzhledem k velkému množství vzorků testovaných na tomto zařízení jsou výsledky rozděleny do dvou grafů. Na obrázku 3.2 jsou do grafu síla-prodloužení vyneseny hodnoty pro struktury s průměrem prutu 3 mm, na obrázku 3.3 pak hodnoty pro struktury s průměrem 1,2 mm.



Obr. 3.2 Graf závislosti síla-prodloužení vzorků s průměrem prutu 3 mm, testovaných na zařízení IMADA MX2-2500N

Tabulka 3 Přehled výsledků vzorků s průměrem prutu 3 mm ze zařízení Imada MX2-2500N

Orientace buňky	Vzorek	Průměr prutu [mm]	$k$ [kN/mm]	Průměrná hodnota $k$
Vertikální	BCC 1	3	4,50	4,47
Vertikální	BCC 2	3	4,44	
Vertikální	BCC 7	3	4,45	
Vertikální	FCC 1	3	XXX	3,61
Vertikální	FCC 2	3	3,19	
Vertikální	FCC 7	3	4,03	
Horizontální	BCC 1	3	4,46	3,87
Horizontální	BCC 2	3	3,47	
Horizontální	BCC 4	3	3,69	
Horizontální	FCC 1	3	2,21	2,14
Horizontální	FCC 2	3	2,07	
Horizontální	FCC 4	3	2,14	



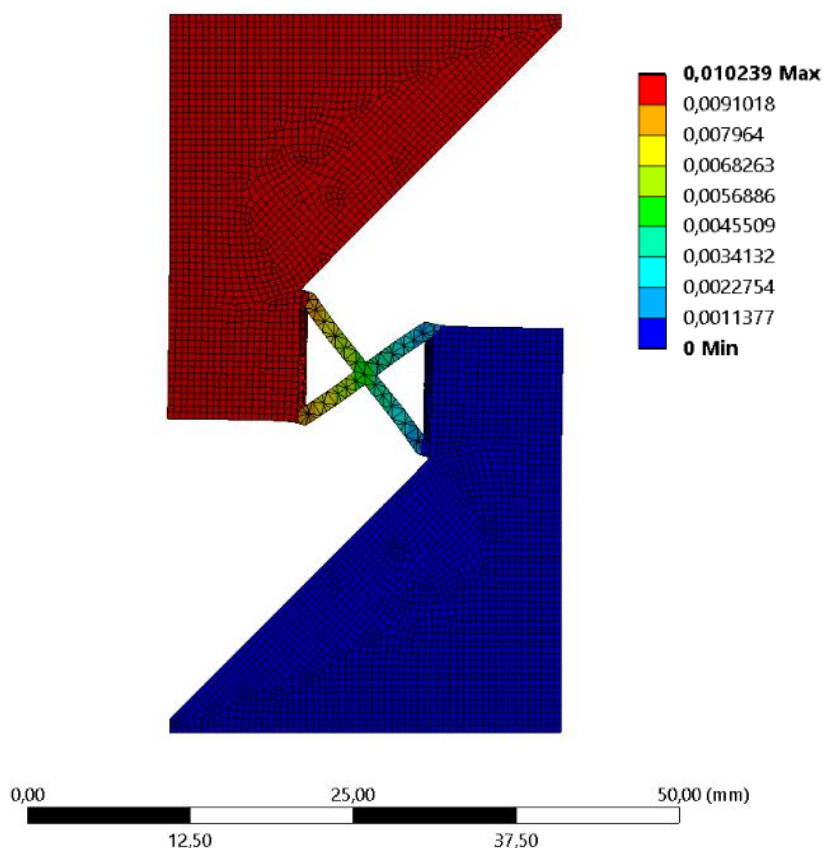
Obr. 3.3 Graf závislosti síla-prodloužení vzorků s průměrem prutu 1,2 mm, testovaných na zařízení IMADA MX2-2500N

Tabulka 4 Přehled výsledků vzorků s průměrem prutu 3 mm ze zařízení Imada MX2-2500N

Orientace buňky	Vzorek	Průměr prutu [mm]	$k$ [kN/mm]	Průměrná hodnota $k$
Vertikální	BCC 2	1,2	0,69	0,76
Vertikální	BCC 3	1,2	0,65	
Vertikální	BCC 7	1,2	0,95	
Vertikální	FCC 2	1,2	0,97	0,96
Vertikální	FCC 3	1,2	1,03	
Vertikální	FCC 7	1,2	0,88	
Horizontální	BCC 2	1,2	0,95	0,97
Horizontální	BCC 3	1,2	0,91	
Horizontální	BCC 4	1,2	1,04	
Horizontální	FCC 1	1,2	XXX	XXX
Horizontální	FCC 2	1,2	XXX	
Horizontální	FCC 4	1,2	XXX	

### 3.3 VÝSLEDKY MKP VÝPOČTŮ

Na obrázku 3.4 lze vidět jeden z výsledků MKP analýzy, kde je vyobrazena celková deformace vzorku, legenda vyjadřuje celkový posuv v mm. Tabulka 5 ukazuje vypočtené (teoretické) hodnoty tuhostní konstanty pro všechny vzorky.



Obr. 3.4 Ukázka vzorku podrobeného MKP Analýze dle daných okrajových podmínek

Tabulka 5 Výsledky MKP výpočtů

Orientace buňky	Vzorek	Průměr prutu [mm]	k [kN/mm]
Vertikální	BCC	1,2	3,66
Vertikální	FCC	1,2	4,07
Horizontální	BCC	1,2	3,66
Horizontální	FCC	1,2	0,04
Vertikální	BCC	3	14,06
Vertikální	FCC	3	14,96
Horizontální	BCC	3	14,06
Horizontální	FCC	3	2,05

### 3.4 SUMARIZACE VÝSLEDKŮ

V následující tabulce 6 jsou získané výsledky z reálných zkoušek i teoretických výpočtů MKP pro přehlednost vloženy do jedné tabulky. U reálných zkoušek jsou uvedeny průměrné hodnoty tuhostních konstant.

*Tabulka 6 Sumarizace výsledků*

Orientace buňky	Typ struktury	Průměr prutu [mm]	Relativní hustota [-]	Tuhostní konstanta $k$ [kN/mm]		
				Zwick	IMADA	MKP
Vertikální	BCC	1,2	0,069	3,09	0,76	3,66
Vertikální	FCC	1,2	0,057	3,44	0,96	4,07
Horizontální	BCC	1,2	0,069	-	0,97	3,66
Horizontální	FCC	1,2	0,057	-	XXX	0,04
Vertikální	BCC	3	0,36	12,21	4,47	14,06
Vertikální	FCC	3	0,29	13,03	3,61	14,96
Horizontální	BCC	3	0,36	-	3,87	14,06
Horizontální	FCC	3	0,29	-	2,14	2,05

## 4 DISKUZE

### 4.1 POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ STRUKTUR V ZÁVISLOSTI NA PRŮMĚRU PRUTU

Výsledky z profesionálního zařízení Zwick/Roell Z250 u všech typů vzorků vykazují po všech stránkách výbornou opakovatelnost. Z těchto výsledků je jasné viditelné, že vzorky s průměrem prutu 3 mm prokázaly výrazně lepší vlastnosti, než vzorky s průměrem prutu 1,2 mm, to platí pro strukturu BCC i FCC. Toto potvrdily také výsledky MKP analýzy. Procentuální rozdíly teoretických výsledků tuhostních konstant mezi různými průměry byly u obou typů struktur téměř totožné s rozdíly výsledků reálných testů. Výrazně lepší vlastnosti struktur s větším průměrem prutu ukázaly také testy ze zařízení Imada MX-2500N. Zde se u struktury BCC mírně lišil rozdíl reálných výsledků s teoretickými, což může být způsobeno nepřesností zařízení (viz kapitola 4.5). Procentuální rozdíly výsledků jsou vyčísleny v tabulce 7.

Tabulka 7 Porovnání tuhostních konstant struktur v závislosti na průměru prutu

Orientace buňky	Typ struktury	Průměr prutu [mm]	Tuhostní konstanta $k$ [kN/mm]		
			MKP	Zwick	Imada
Vertikální	BCC	3	14,06	12,21	4,47
Vertikální	BCC	1,2	3,66	3,09	0,76
Procentuální rozdíl			-74,0 %	-74,7 %	-83,0 %
Vertikální	FCC	3	14,96	13,03	3,61
Vertikální	FCC	1,2	4,07	3,44	0,96
Procentuální rozdíl			-72,8 %	-73,6 %	-73,4 %

### 4.2 POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ STRUKTUR V ZÁVISLOSTI NA TYPU STRUKTURY

Výsledky ze zařízení Zwick/Roell Z250 i z MKP výpočtů ukázaly u obou průměrů prutů lepší vlastnosti FCC struktur než struktur BCC. Toto může být způsobeno tím, že FCC struktura má lepší rozložení prutů v buňce. Imada MX2-2500N lepší výsledky FCC struktury oproti BCC struktuře prokázala pouze při průměru prutu 1,2 mm. U struktur s průměrem prutu 3 mm dosahují u tohoto zařízení vyšších hodnot tuhostních konstant naopak struktury BCC. V tabulce 8 jsou opět procentuálně vyčísleny rozdíly výsledků.

Tabulka 8 Porovnání tuhostních konstant struktur v závislosti na typu struktury

Orientace buňky	Typ struktury	Průměr prutu [mm]	Tuhostní konstanta $k$ [kN/mm]		
			MKP	Zwick	Imada
Vertikální	BCC	3	14,06	12,21	4,47
Vertikální	FCC	3	14,96	13,03	3,61
Procentuální rozdíl			+6,4 %	+6,7 %	-19,2 %
Vertikální	BCC	1,2	3,66	3,09	0,76
Vertikální	FCC	1,2	4,07	3,44	0,96
Procentuální rozdíl			+11,2 %	+11,3 %	+26,3 %

### 4.3 ZHODNOCENÍ Vlivu TECHNOLOGIE VÝROBY NA VLASTNOSTI STRUKTUR

Na základě poznatků z předchozích podkapitol diskuze lze tvrdit, že výsledky reálných zkoušek ze zařízení Zwick/Roell Z250 relativně odpovídají teoretickým výsledkům MKP výpočtů. Výsledky reálných testů se však od výsledků teoretických liší svými absolutními hodnotami. To může být přisuzováno zejména vlivu technologie výroby na mechanické vlastnosti vzorků. Na základě předchozích výzkumů by tento vliv měl být větší u struktur s menšími průměry prutů než u těch s průměry prutů většími. Reálné hodnoty tuhostní konstanty u vzorků s průměrem prutu 1,2 mm se od teoretických hodnot lišily u BCC i FCC struktury o nějakých 15,5 %. U obou typů struktur s průměrem prutu 3 mm byl rozdíl reálných hodnot od teoretických zhruba 13 %. Lze tedy potvrdit, že vliv technologie na vlastnosti struktury byl u buněk s menším průměrem prutu větší než u buněk s větším průměrem prutu, a to o cca 2,5 %. Hodnota 2,5 % je ovšem tak nízká, že toto nelze tvrdit jednoznačně. Aby se tento vliv technologie mohl jednoznačně potvrdit, bylo by nutné vycházet z výsledků většího množství vzorků. Procentuální vyčíslení vlivu technologie je znázorněno v tabulce 9.

Tabulka 9 Zhodnocení vlivu technologie na vlastnosti vzorků

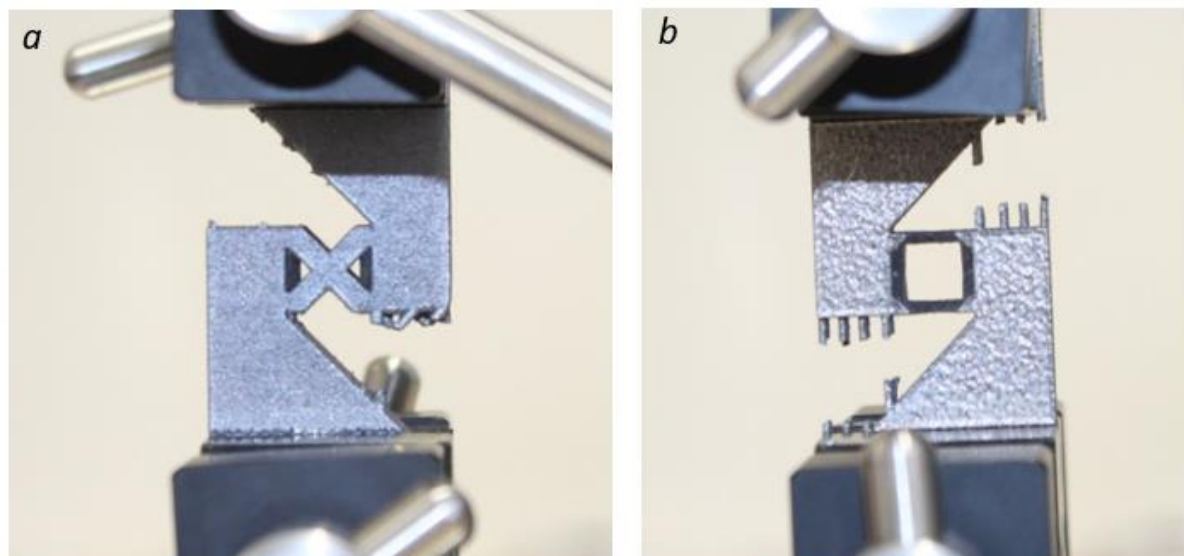
Orientace buňky	Typ struktury	Průměr prutu [mm]	Tuhostní konstanta $k$ [kN/mm]		Procentuální rozdíl	Průměr
			MKP	Zwick		
Vertikální	BCC	3	14,06	12,21	-13,2 %	-13,0 %
Vertikální	FCC	3	14,96	13,03	-12,9 %	
Vertikální	BCC	1,2	3,66	3,09	-15,6 %	-15,5 %
Vertikální	FCC	1,2	4,07	3,44	-15,5 %	

### 4.4 POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ STRUKTUR V ZÁVISLOSTI NA SMĚRU ZATÍŽENÍ

Na zařízení Imada MX2-2500N byly testovány také horizontální vzorky (viz obr. 4.1b). Struktura FCC s průměrem prutu 3 mm v horizontální orientaci prokázala ani ne dvojnásobně horší vlastnosti než v orientaci vertikální. Horší vlastnosti horizontálního vzorku FCC ukazují také výsledky MKP analýzy, zde je však rozdíl oproti vertikálním vzorkům asi sedminásobný. FCC struktura s průměrem prutu 1,2 mm v horizontální orientaci byla podrobena stejným zkouškám, nicméně její tuhost se ukázala natolik nízká, že zařízení nebylo schopno zaznamenat smysluplné výsledky. Nízkou tuhost této struktury v horizontálním směru potvrdila také MKP analýza, kdy se ukázalo, že její tuhostní konstanta byla pouhých necelých 0,04 kN/mm. Výrazně horší vlastnosti struktury FCC v horizontálním směru způsobuje špatné rozmístění prutů v příčném směru vzorku. Tyto výsledky byly očekávané.

Vzorek BCC byl také otestován i v horizontální orientaci. BCC struktura je v základních směrech zatěžování izotropní, rozdíly ve výsledcích se tedy v porovnání s vertikálními vzorky neočekávaly nikterak razantní. Zde byl zkoumán pouze vliv směru výroby vzorku. Výsledky zkoušek ukázaly u průměru prutu 3 mm mírně lepší vlastnosti vzorku vyráběného vertikálně, u průměru prutu 1,2 mm měl naopak mírně lepší vlastnosti vzorek horizontální. Toto ovšem nelze vzhledem ke spolehlivosti zařízení (viz kapitola 4.5) považovat za směrodatné.





Obr. 4.1 Struktura FCC s průměrem prutu 3 mm zatěžována vertikálně (a) a horizontálně (b)

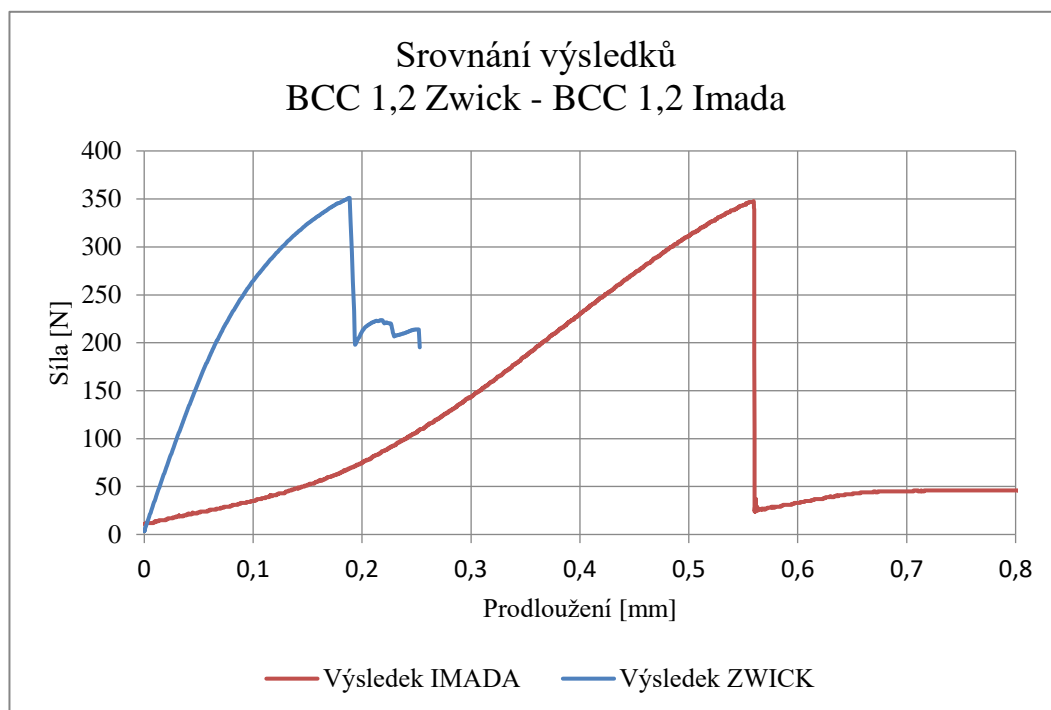
Tabulka 10 Porovnání tuhostních konstant struktur v závislosti na typu struktury

Orientace buňky	Typ struktury	Průměr prutu [mm]	Tuhostní konstanta $k$ [kN/mm]	
			MKP	Imada
Vertikální	FCC	3	14,96	3,61
Horizontální	FCC	3	2,05	2,14
Procentuální rozdíl			-86,3 %	-40,7 %
Vertikální	FCC	1,2	4,07	0,96
Horizontální	FCC	1,2	0,04	XXX
Procentuální rozdíl			-99,0 %	XXX
Vertikální	BCC	3	14,06	4,47
Horizontální	BCC	3	14,06	3,87
Procentuální rozdíl			0,0 %	-13,4 %
Vertikální	BCC	1,2	3,66	0,76
Horizontální	BCC	1,2	3,66	0,97
Procentuální rozdíl			0,0 %	+27,6 %

#### 4.5 ZHODNOCENÍ SMĚRODATNOSTI VÝSLEDKŮ Z JEDNOTLIVÝCH ZAŘÍZENÍ

Absolutní hodnoty výsledků vertikálních vzorků ze zařízení Imada MX2-2500N jsou diametrálně menší, než hodnoty ze zařízení Zwick/Roell Z250 a z MKP výpočtů. Při testování na tomto zařízení došlo k několika problémům. Jak lze vidět v grafu (obr. 3.2), zařízení nedokázalo tuhé vzorky (BCC a FCC s průměrem prutů 3 mm) dovést do úplného porušení. Většina vzorků při určité síle začala prokluzovat v upínacích kleštích až se některé vzorky v určitém okamžiku vysmýkly úplně. Toto je pravděpodobně hlavní důvod nízkých hodnot tuhostních konstant z tohoto zařízení. Méně tuhé vzorky, které byly dovedeny k úplnému porušení byly přetrženy při zhruba stejné síle jako u profesionálního zařízení, nicméně tuhostní konstanty se ani v tomto případě nepřibližovaly teoretickým výsledkům a výsledkům

ze zařízení Zwick. Rozdílné tuhosti při obdobné síle při přetržení vzorku jsou pro názornost vyneseny do společného grafu (viz obr. 4.2).



Obrázek 4.2 Srovnání výsledků struktury BCC s průměrem prutu 1,2 mm ze zařízení Zwick/Roell Z250 a Imada MX2-2500N

Při testu na zařízení Imada MX2-2500N byla nastavena rychlost posuvu o velikosti 10 mm/min, nicméně na základě neočekávaných výsledků testů bylo po zkouškách zkoumáno, zda nastavená rychlost odpovídala rychlosti skutečné. Toto bylo provedeno metodou optického měření polohy a trasování bodu, kdy bylo zjištěno, že zařízení nedokáže v tomto případě udržet konstantní rychlost a byly odvozeny reálné rychlosti. Reálné rychlosti tedy u vzorků s průměrem prutu 3 mm měly hodnoty přibližně 3 mm/min a u vzorků s průměrem prutu 1,2 mm přibližně 8 mm/min. Ani po korekci rychlostí však absolutní hodnoty tuhostních konstant nebyly uspokojivé. Výsledky z tohoto zařízení jsou relativně porovnatelné mezi sebou, nicméně jejich absolutní hodnoty nemůžou být brány jako směřodátne. Zařízení Imada MX2-2500N lze tímto považovat za nevhodné pro experimenty tohoto charakteru.

#### 4.6 VYHODNOCENÍ VLIVU ROZMÍSTĚNÍ VZORKŮ PŘI VÝROBĚ

V tomto případě nebyl zjištěn žádný zásadní vliv pozice, kde na platformě byly jednotlivé vzorky postaveny na jejich vlastnosti.

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce pojednává o mechanických vlastnostech mikro-prutových struktur vyráběných metodou SLM, které nacházejí využití při odlehčování nebo zlepšení schopnosti absorpce kinetické energie dílů. Existuje řada výzkumů, které se touto problematikou zabývají, nicméně tyto výzkumy jsou většinou zaměřeny na chování těchto struktur při zatěžování tlakem či tahem. Tato práce je zaměřena na mechanické vlastnosti mikro-prutových struktur při zatěžování smykem, kdy byly porovnávány teoretické výsledky MKP analýzy s výsledky reálných testů.

Pro experiment byl navržen způsob smykového testování pomocí přípravků inspirovaných normou ASTM D7078, která se zabývá testováním kompozitů. Pro testování byly navrženy speciální vzorky struktur BCC a FCC s průměry prutů 1,2 a 3 mm.

Testování proběhlo na dvou zařízeních, jedno z nich bylo profesionální a druhé určené spíše pro výukové účely. Výsledky z profesionálního zařízení prokázaly výsledky, které se dobře shodovaly s výsledky MKP výpočtů. Zařízení určené k výukovým účelům se ukázalo i přesto, že v některých ohledech prokázalo relativně odpovídající výsledky pro experimenty podobného typu jako nevhodné.

Na základě výsledků bylo zjištěno, že velikost průměru prutu struktury má zásadní vliv na její mechanické vlastnosti. Struktury s větším průměrem prutu prokazovaly u obou typů struktur výrazně lepší vlastnosti než struktury s průměrem prutu menším. Dále byla při smykovém testování zjištěna lepší tuhost vzorku FCC oproti vzorku BCC, a to u obou průměrů prutů. U struktur FCC byly potvrzeny výrazně lepší vlastnosti při zatěžování ve vertikálním směru oproti zatěžování ve směru horizontálním. Dále byl pozorován vliv technologie výroby metodou SLM na mechanické vlastnosti vzorků. Ukázalo se že u obou typů struktur s průměrem prutu 1,2 mm byl tento vliv mírně větší než u struktur s průměrem 3 mm.

Vzhledem k předpokladu, že zvolený přípravek k testování nebyl ideálně tuhý, pravděpodobně nedošlo při testování k čistému smyku a nelze z výsledků přímo vyvodit smykový modul pružnosti struktury. Toto by bylo možné například pomocí detailnější MKP analýzy, což je však nad rámec této bakalářské práce a je to jednou z motivací pro další práci. Mechanické vlastnosti struktur při smykovém zatížení byly v této práci tedy odvozovány na základě tuhostní konstanty, která tyto vlastnosti odhaduje pouze do jisté míry. Motivací pro další práci je tedy také optimalizovat experiment tak, aby se co nejvíce přiblížil čistému smyku struktury a bylo tak dosaženo ještě přesnějších výsledků.

Všechny cíle bakalářské práce byly splněny.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] „Vypečená“ konzola míří z tiskárny do vesmíru. *Zprávy z VUT* [online]. Brno: Vysoké Učení Technické v Brně, 2015 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: [https://zvut.cz/napady-objevy/napady-a-objevy-f38103/vypecena-konzola-miri-z-tiskarny-do-vesmiru-d103894?aid\\_redir=1](https://zvut.cz/napady-objevy/napady-a-objevy-f38103/vypecena-konzola-miri-z-tiskarny-do-vesmiru-d103894?aid_redir=1)
- [2] ASHBY, M F. The properties of foams and lattices. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* [online]. 2006, **364**(1838), 15-30 [cit. 2021-5-16]. ISSN 1364-503X. Dostupné z: doi:10.1098/rsta.2005.1678
- [3] GÜMRÜK, Recep, R.A.W. MINES a Sami KARADENIZ. Static mechanical behaviours of stainless steel micro-lattice structures under different loading conditions. *Materials Science & Engineering A* [online]. Elsevier B.V, 2013, **586**, 392 [cit. 2021-5-16]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.msea.2013.07.070
- [4] GRIFFITHS, Valeriya, James P SCANLAN, Murat H ERES, Antonio MARTINEZ-SYKORA a Phani CHINCHAPATNAM. Cost-driven build orientation and bin packing of parts in Selective Laser Melting (SLM). *European journal of operational research* [online]. Elsevier B.V, 2019, **273**(1), 334-352 [cit. 2021-5-16]. ISSN 0377-2217. Dostupné z: doi:10.1016/j.ejor.2018.07.053
- [5] *Kovové pěny* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <http://www.zlepsistechniku.cz/technicke-vychytavky/kovove-peny/>
- [6] FALKOWSKI, Gay. *Multiple Sclerosis Foundation - Prevent Osteoporosis with 6 Bone Health Boosters* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://msfocus.org/Magazine/Magazine-Items/Posted/Prevent-Osteoporosis-with-6-Bone-Health-Boosters>
- [7] *Aluminum Foam Large Cell Panel from Cymat Technologies Ltd.* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://line.17qq.com/articles/nmgpwpfny.html>
- [8] DOWNING, David, Alistair JONES, Milan BRANDT a Martin LEARY. Increased efficiency gyroid structures by tailored material distribution. *Materials & design* [online]. Elsevier, 2021, **197** [cit. 2021-5-16]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2020.109096
- [9] HYDE, St a Ge SCHRODER-TURK. Geometry of interfaces: topological complexity in biology and materials INTRODUCTION. *Interface Focus* [online]. ROYAL SOC, 2012, **2**(5), 529-538 [cit. 2021-5-16]. ISSN 2042-8898. Dostupné z: doi:10.1098/rsfs.2012.0035
- [10] WEISSTEIN, Eric W. *Gyroid* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://mathworld.wolfram.com/Gyroid.html>
- [11] CABRNOCH, Bohuslav. *Porovnání zkušebních metod pro měření interlaminní smykové pevnosti laminátů* [online]. 2012 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: [http://www.csm-kompozity.wz.cz/ILSS\\_Cabrnach\\_2010.pdf](http://www.csm-kompozity.wz.cz/ILSS_Cabrnach_2010.pdf)

- [12] Instron Industrial Products [online katalogový list]. *V-Notch Shear Fixtures ASTM D5379 & D7078* [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.instron.us/-/media/literature-library/products/2014/08/vnotch-shear-fixtures-astm-d-5379--d-7078.pdf>
- [13] Admet, Inc. *ASTM D5379 Composite Shear Testing* [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.admet.com/testing-applications/testing-standards/astm-d5379-composite-shear-testing/>
- [14] BEDNÁŘ, Peter. *Zpracování podkladů pro návrh objemových a plošných struktur* [online]. Brno, 2013 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/26247>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí práce Daniel Koutný.
- [15] Admet, Inc. *ASTM D7078 Composite V-Notched Rail Shear Testing* [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.admet.com/testing-applications/testing-standards/astm-d7078-composite-v-notched-rail-shear-testing/>
- [16] CARLSSON, L. A, D. F ADAMS a R. B PIPES. Basic Experimental Characterization of Polymer Matrix Composite Materials. *Polymer reviews* [online]. Taylor & Francis Group, 2013, **53**(2), 277-302 [cit. 2021-5-16]. ISSN 1558-3724. Dostupné z: doi:10.1080/15583724.2013.776588
- [17] Instron Industrial Products [online katalogový list]. *Composites Test Fixtures Two Rail Shear, ASTM D4255* [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.instron.us/-/media/literature-library/products/2011/06/composites-test-fixtures-two-rail-shear-astmd4255.pdf>
- [18] GANESAN, T. Experimental characterization of interlaminar shear strength. *Delamination Behaviour of Composites*. Elsevier, 2008, s. 117-137. ISBN 9781845692445. Dostupné z: doi:10.1533/9781845694821.1.117
- [19] YAP, C. Y., C. K. CHUA, Z. L. DONG, Z. H. LIU, D. Q. ZHANG, L. E. LOH a S. L. SING. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews* [online]. AIP Publishing, 2015, **2**(4) [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: doi:10.1063/1.4935926
- [20] Boris Kolář K&K, s.r.o. *SLM 280 HL* [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <http://www.kolarkk.cz/index.php/slm/51-slm-zarizeni/163-slm-280-hl>
- [21] Zwick Roell Group [online katalogový list]. *Zwick Z100/Z250 materials testing machine with central ball-lead screw* [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: [https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user\\_upload/PI\\_EN/08\\_437\\_Single\\_screw\\_testing\\_machine\\_PI\\_EN.pdf](https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_EN/08_437_Single_screw_testing_machine_PI_EN.pdf)
- [22] LEARY, Martin, Maciej MAZUR, Joe ELAMBASSERIL, et al. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials & design* [online]. Elsevier, 2016, **98**, 344-357 [cit. 2021-5-18]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.02.127

- [23] TANCOGNE-DEJEAN, Thomas, Adriaan B SPIERINGS a Dirk MOHR. Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading. *Acta materialia* [online]. Elsevier, 2016, **116**, 14-28 [cit. 2021-5-18]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2016.05.054

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

3D	Trojrozměrný
BCC	Body centred cubic
BCCZ	Body centred cubic se vzpěrami v ose z
BFCC	Body-face centred cubic
BFCCZ	Body-face centred cubic se vzpěrami v ose z
CAD	Computer aided design
FCC	Face centred cubic
FCCZ	Face centred cubic se vzpěrami v ose z
MKP	Metoda konečných prvků
SLM	Selective laser melting
STL	Stereolitography (formát souborů)

$a$	[mm]	Délka hrany buňky
$b$	[-]	Počet vzpěr buňky
$E$	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
$G$	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
$j$	[-]	Počet spojů buňky
$k$	[kN·mm <sup>-1</sup> ]	Tuhostní konstanta
$M$	[-]	Maxwellovo číslo
$V$	[mm <sup>3</sup> ]	Objem prostoru ohraničujícího buňku
$V_S$	[mm <sup>3</sup> ]	Objem materiálu v buňce
$\mu$	[-]	Poissonovo číslo
$\bar{\rho}$	[-]	Relativní hustota